

Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Ambiental

## **Estudio de la calidad acústica del aula 008**

Autor: Carmen Bella Castrillo

Tutor: Juana Mayo Núñez

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2015





Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Ambiental

# **Estudio de la calidad acústica del aula 008**

Autor:  
Carmen Bella Castrillo

Tutor:  
Juana Mayo Núñez

Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2015

## Índice

• <b>Capítulo 0. Introducción y objetivos.</b>	<b>12</b>
Introducción	13
Objetivos	15
• <b>Capítulo I. Psicoacústica.</b>	<b>16</b>
1.1 Preámbulo	17
1.2 Objetivos de la psicoacústica	17
1.3 El oído humano	18
1.4 Conceptos básicos de psicoacústica	19
1.4.1 Umbrales de la audición	19
1.4.2 Enmascaramiento sonoro	21
1.4.3 Bandas críticas	24
1.4.4 Sonoridad	25
• <b>Capítulo II. Acústica arquitectónica.</b>	<b>27</b>
2.1 Preámbulo	28
2.2 Espacios destinados a la palabra	28
2.2.1 Aulas	29
2.3 Elementos de la comunicación	31
2.3.1 Emisor	32
2.3.2 Canal de transmisión	34
2.3.3 Receptor	38
2.4 Acústica geométrica	39

2.4.1	Formas	42
2.4.1.1	Superficies planas	43
2.4.1.2	Superficies curvas	45
<b>2.5</b>	<b>Materiales y mecanismos de acondicionamiento acústico</b>	<b>48</b>
2.5.1	Absorbentes	49
2.5.2	Resonadores	51
2.5.3	Reflectores	54
2.5.4	Difusores	55
<b>•</b>	<b>Capítulo III. Diseño acústico de aulas.</b>	<b>57</b>
<b>3.1</b>	<b>Preámbulo</b>	<b>58</b>
<b>3.2</b>	<b>Parámetros acústicos</b>	<b>58</b>
3.2.1	Nivel de presión sonora (SPL)	58
3.2.2	Tiempo de reverberación	59
3.2.3	Calidez acústica	64
3.2.4	Brillo	64
3.2.5	Tiempo de caída inicial (EDT)	65
3.2.6	Claridad de la voz ( $C_{50}$ )	66
3.2.7	Definición (D)	67
3.2.8	Pérdida de articulación de consonantes (%ALCons)	68
3.2.9	Índice de transmisión del habla (STI)	70
3.2.10	RASTI (“Rapid Speech Transmission Index”)	72
3.2.11	Criterio de ruido de fondo	74
<b>•</b>	<b>Capítulo IV. Caracterización acústica del aula.</b>	<b>78</b>

<b>4.1 Preámbulo</b>	<b>79</b>
<b>4.2 Descripción del aula</b>	<b>79</b>
<b>4.3 Equipo de medida</b>	<b>82</b>
4.3.1 Symphonie	82
4.3.2 Micrófono	83
4.3.3 Preamplificador	83
4.3.4 Fuente dodecaédrica	83
4.3.5 Amplificador de potencia	84
<b>4.4 Montaje</b>	<b>85</b>
<b>4.5 Procedimiento de medida</b>	<b>85</b>
4.5.1 Medición del ruido de fondo	86
4.5.2 Medición del tiempo de reverberación	87
4.5.3 Medición de los distintos parámetros de inteligibilidad	91
 <b>• Capítulo V. Análisis de los resultados.</b>	 <b>94</b>
<b>5.1 Preámbulo</b>	<b>95</b>
<b>5.2 Resultados y análisis de las mediciones</b>	<b>95</b>
5.2.1 Ruido de fondo	95
5.2.2 Tiempo de reverberación	97
5.2.3 Diferentes parámetros de inteligibilidad	99
5.2.3.1 EDT	100
5.2.3.2 $D_{50}$	102
5.2.3.3 $C_{50}$	105
5.2.3.4 STI y RASTI	107
 <b>• Capítulo VI. Predicción acústica del aula.</b>	 <b>110</b>

<b>6.1 Preámbulo</b>	<b>111</b>
<b>6.2 Validación de la simulación</b>	<b>111</b>
6.2.1 Tiempo de reverberación	117
6.2.2 Diferentes parámetros de inteligibilidad	119
<b>6.3 Mejoras acústicas</b>	<b>122</b>
6.3.1 Simulación 1	122
6.3.1.1 Tiempo de reverberación	123
6.3.1.2 Diferentes parámetros de inteligibilidad	124
6.3.2 Simulación 2	126
6.3.2.1 Tiempo de reverberación	127
6.3.2.2 Diferentes parámetros de inteligibilidad	128
• <b>Capítulo VII. Conclusiones.</b>	<b>131</b>
<b>7.1 Resumen</b>	<b>132</b>
<b>7.2 Conclusiones</b>	<b>132</b>
• <b>Bibliografía</b>	<b>139</b>

## Índice de figuras

### • Capítulo I. Psicoacústica.

Figura 1.1 Corte transversal del oído humano	18
Figura 1.2 Área de audición humana	20
Figura 1.3 Nivel de sensación de una señal de prueba apenas audible en función del tiempo	24
Figura 1.4 Representación de un tono enmascarado	24
Figura 1.5 Curvas de ponderación de un sonómetro	26

### • Capítulo II. Acústica arquitectónica.

Figura 2.1 Evolución temporal de la energía sonora correspondiente a la emisión de una vocal seguida de una consonante en un recinto cerrado	33
Figura 2.2 Impresión subjetiva de dos sonidos con diferentes retardos	36
Figura 2.3 Relación entre el retardo y el nivel de sonido directo-reflejado	37
Figura 2.4 Representación del sonido directo, primeras reflexiones y reflexiones tardías junto con el ecograma asociado	38
Figura 2.5 Representación del sonido directo (línea discontinua) y sonido indirecto (línea continua) que recibe el receptor	39
Figura 2.6 Ejemplo de llegada del sonido directo y de las primeras reflexiones a un receptor	40
Figura 2.7 Reflexión especular del sonido sobre una superficie	41
Figura 2.8 Ejemplo de difracción del sonido alrededor de una barrera acústica instalada delante de una vivienda a modo de protección frente al ruido	42
Figura 2.9 Primeras reflexiones de las paredes laterales de una sala	44
Figura 2.10 Primeras reflexiones de la pared frontal y pared del fondo	44
Figura 2.11 Primeras reflexiones del techo y suelo	45
Figura 2.12 Reflexiones sobre una superficie curva	46



Figura 2.13 Reflexiones sobre una elipse y focalizaciones	46
Figura 2.14 Reflexiones sobre una parábola y focalizaciones	47
Figura 2.15 Resonador de membrana	51
Figura 2.16 Resonador simple de cavidad o resonador de Helmholtz	52
Figura 2.17 Resonador múltiple de cavidad	53
Figura 2.18 Resonador de cavidad múltiple	54
Figura 2.19 Difusor	56

### • **Capítulo III. Diseño acústico de aulas.**

Figura 3.1 Ejemplo de diagrama de tiempo de reverberación	60
Figura 3.2 Márgenes de valores recomendados de $TR_{mid}$ en función del tipo de sala	61
Figura 3.3 Relación entre EDT y TR	66
Figura 3.4 Correspondencia entre STI/RASTI y %ALCons	74
Figura 3.5 Relación entre %ALCons, STI/RASTI y la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad	74
Figura 3.6 Gráfica y valores de las curvas NC (Noise Criteria)	76
Figura 3.7 Valores de curvas NC recomendadas para diferentes tipos de recintos	77

### • **Capítulo IV. Caracterización acústica del aula.**

Figura 4.1 Vista del aula 008 desde la pared del fondo	80
Figura 4.2 Vista del aula 008 desde la pared de las pizarras	80
Figura 4.3 Vista del aula 008 desde la esquina superior derecha	81
Figura 4.4 Vista del aula 008 desde la esquina superior izquierda	81
Figura 4.5 Symphonie	82
Figura 4.6 Preamplificador	83
Figura 4.7 Fuente dodecaédrica	84

Figura 4.8 Diagramas polares de directividad del dodecaedro utilizado correspondientes a las bandas de 250 Hz, 1 kHz y 4 kHz (plano horizontal y plano vertical)	84
Figura 4.9 Amplificador de potencia similar al utilizado en las mediciones	84
Figura 4.10 Montaje del equipo de medida	85
Figura 4.11 Posiciones del micrófono en la medición del ruido de fondo	86
Figura 4.12 Número mínimo de posiciones y mediciones para los diferentes métodos de medida	87
Figura 4.13 Posiciones de la fuente y los micrófonos durante las mediciones en el aula 008	88

- **Capítulo V. Análisis de los resultados.**

Figura 5.1 Diagrama de la primera medida del ruido de fondo	95
Figura 5.2 Comparación de la curva medida con las curvas NC recomendadas para aulas de enseñanza	97
Figura 5.3 Diagrama y curvas de decrecimiento correspondientes a la primera medida del tiempo de reverberación	98
Figura 5.4 Valores de la primera medición de los distintos parámetros de inteligibilidad	100
Figura 5.5 Relación entre %ALCons, STI/RASTI y la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad	109

- **Capítulo VI. Predicción acústica del aula.**

Figura 6.1 Esquema del algoritmo de CATT Acoustic	112
Figura 6.2 Coeficientes de absorción y difusión de los materiales del aula 008 introducidos en la simulación	113
Figura 6.3 Diferentes vistas del aula 008 simulada en el programa CATT Acoustic	114
Figura 6.4 Mapa del sonido directo del aula 008	115

Figura 6.5 Mapa del sonido global (sonido directo + sonido reflejado) del aula 008	116
Figura 6.6 Mapa del parámetro $D_{50}$ del aula 008	116
Figura 6.7 Mapa del parámetro $C_{50}$ del aula 008	117
Figura 6.8 Mapa del parámetro STI del aula 008	117
Figura 6.9 Coeficientes de absorción del material absorbente 1 y material absorbente 2	122
Figura 6.10 Perfil del aula 008 con el techo inclinado	126
Figura 6.11 Relación entre %ALCons, STI/RASTI y la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad	130

- **Capítulo VII. Conclusiones.**

Figura 7.1 Diferentes simulaciones del tiempo de reverberación	133
Figura 7.2 Diferentes simulaciones del tiempo de caída inicial	134
Figura 7.3 Diferentes simulaciones de la definición	135
Figura 7.4 Diferentes simulaciones de la claridad de la voz	136
Figura 7.5 Diferentes simulaciones del índice de transmisión del habla	137

# **Capítulo 0. Introducción y objetivos.**

## **Capítulo 0. Introducción y objetivos.**

### **Introducción**

Son numerosos los edificios que cumplen con los requisitos estructurales y funcionales para su uso, pero quizás no lo hacen cuando hablamos de los requisitos acústicos. En el proyecto que se presenta a continuación se analiza la calidad auditiva del aula 008 de la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, con el fin de establecer si su acondicionamiento acústico es el adecuado o necesitaría ser mejorado, sin entrar a valorar el aislamiento acústico de la misma.

El estudio de la acústica es de suma importancia durante el diseño de un recinto, y en las aulas docentes lo es, especialmente, por la necesidad de crear unas condiciones adecuadas para la docencia.

Uno de los objetivos acústicos fundamentales que se pretende conseguir cuando se diseña un espacio para el habla es que la inteligibilidad de la palabra sea óptima en todos sus puntos. Cuando las aulas no tienen un tratamiento acústico adecuado, la inteligibilidad del discurso disminuye, y por lo tanto, se reducen los niveles de concentración y aprendizaje de los estudiantes.

Otro de los parámetros esenciales para determinar la calidad acústica de un recinto es el tiempo de reverberación, definido como el tiempo que tarda el nivel de presión acústica en reducirse 60 dB por debajo de su nivel inicial. El tiempo de reverberación depende de las dimensiones y la forma del espacio, así como de la cantidad, la calidad y la posición de las superficies absorbentes dentro de este espacio. Cuanta más absorción acústica tenga la estancia, menor será el tiempo de reverberación.

Este proyecto se centra en evaluar el grado de comprensión del mensaje oral desde diferentes perspectivas. El proyecto se divide en una parte teórica y otra práctica. La primera de ellas, la parte teórica, consta de tres capítulos. En el primer capítulo se desarrolla el concepto de psicoacústica, ciencia que estudia la percepción del sonido. En el siguiente capítulo se habla de la acústica arquitectónica, cuyo fin es proporcionar la máxima calidad acústica posible al mensaje sonoro emitido en una sala. El último capítulo de la parte teórica corresponde al diseño acústico, en el cual se definen los diferentes parámetros que se utilizan para evaluar la calidad acústica del aula, así como los valores recomendados de los mismos.

La parte práctica está constituida también por diferentes capítulos, en concreto, por tres. Los dos primeros, son experimentales, en los cuales se caracteriza el aula objeto de estudio mediante las distintas medidas realizadas “in situ”, verificando si se cumplen los requisitos acústicos establecidos para la calidad acústica de un aula.

El capítulo final de la parte práctica del proyecto es computacional. En este capítulo se hacen diferentes simulaciones del aula 008 con el fin de mejorar la acústica del aula. Modificando la geometría del aula o los distintos materiales que la componen se podrá obtener una mejoría de la calidad acústica de la misma.

## **Objetivos**

- Conocer desde un punto de vista teórico la manera en la que percibimos los sonidos a través de la psicoacústica.
- Entender la propagación del sonido mediante la acústica arquitectónica y geométrica, estudiando los diferentes fenómenos que intervienen en ella.
- Caracterizar acústicamente el aula objeto de estudio con la finalidad de determinar su calidad acústica.
- Proponer mejoras mediante la simulación acústica del aula para así conseguir unos niveles acústicos óptimos para la docencia en el aula.

# **Capítulo I. Psicoacústica.**



## **Capítulo I. Psicoacústica.**

### **1.1 Preámbulo**

La audición humana es un proceso extraordinariamente complejo. Escuchar no es meramente un fenómeno mecánico de la propagación de la onda, posteriormente conlleva también un tratamiento sensorial y perceptivo. Cuando una persona escucha algún sonido, este llega al oído a través de un medio de propagación, normalmente el aire, como una onda acústica, la cual se transforma en impulsos eléctricos neurológicos que son percibidos después por el cerebro.

### **1.2 Objetivos de la psicoacústica**

La psicoacústica es la disciplina encargada de estudiar la interconexión entre las propiedades físicas del sonido y la interpretación que el ser humano hace de estas propiedades.

La ciencia de la psicoacústica tiene por objeto:

- Caracterizar la respuesta de nuestro sistema auditivo, es decir, cómo se relaciona la magnitud de la sensación producida por el estímulo con la magnitud física del estímulo.
- Obtener el umbral absoluto de la sensación.
- Obtener el umbral diferencial de determinado parámetro del estímulo (mínima variación y mínima diferencia posible).
- Comprender y obtener la capacidad de resolución del sistema auditivo para separar estímulos simultáneos, o para conjugar estímulos separados para crear sensaciones.

- Entender la variación en el tiempo de la sensación del estímulo.

La realización de experimentos a efectos de obtener valores y escalas que puedan reflejar las propiedades del sistema auditivo es solo una rama de la ciencia de la psicoacústica. La otra componente es la de diseñar modelos que permitan explicar los resultados obtenidos experimentalmente.

### 1.3 El oído humano

El órgano que representa el mecanismo auditivo humano es el oído, que, a pesar de su pequeño tamaño, es un órgano muy complejo. El oído humano está formado por tres secciones: el oído externo, el oído medio y el oído interno.

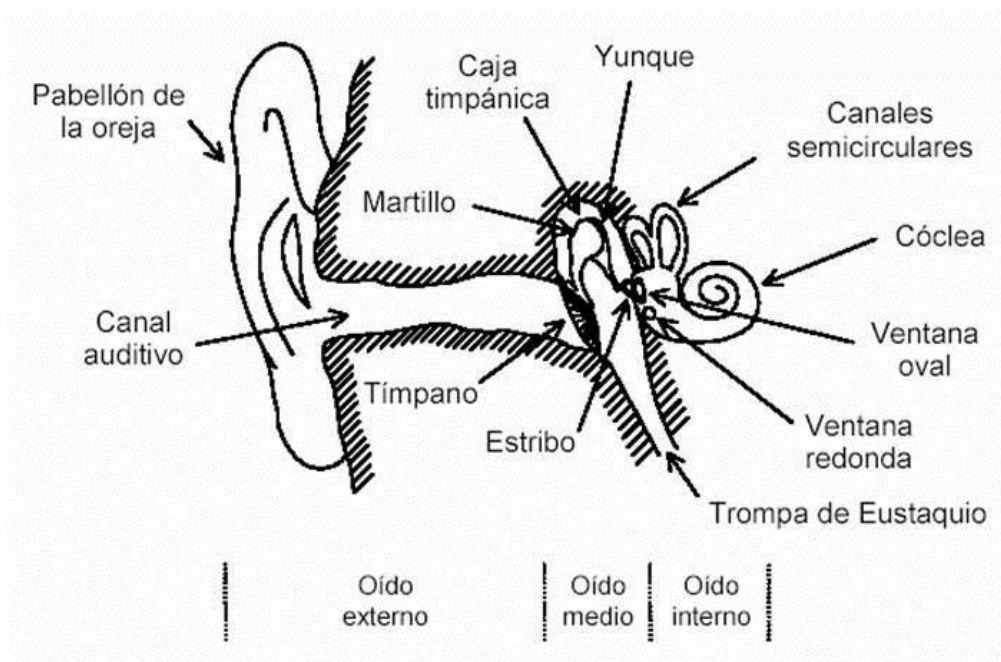


Figura 1.1 Corte transversal del oído humano [19]

El oído externo consta del pabellón y el canal auditivo. El pabellón recoge las ondas sonoras y las conduce hacia el canal auditivo mediante reflexiones y difracciones. Finalmente, el canal auditivo es el encargado de conducir el sonido al tímpano. Debido

a la forma y las dimensiones físicas del oído externo, este posee una resonancia cuya frecuencia está en las proximidades de los 3000 Hz.

El oído medio está ubicado en la caja timpánica y lo integran el tímpano, los huesecillos u osículos y la trompa de Eustaquio. El tímpano recibe las vibraciones del aire y las comunica a los huesecillos (martillo, yunque y estribo), los cuales las dirigen hacia el oído interno. La trompa de Eustaquio es un pequeño conducto que comunica la caja timpánica con la laringe. Su función es la de igualar la presión del oído medio con la presión atmosférica.

Por último, el oído interno, el cual está constituido por el laberinto (cavidad ósea que contiene los canales semicirculares), el vestíbulo y el caracol, transforma los impulsos mecánicos en excitaciones nerviosas que llegan al cerebro a través de las neuronas, el cual reconoce la información recibida en función de las referencias previas de los sistemas de memoria.

## **1.4 Conceptos básicos de psicoacústica**

### **1.4.1 Umbrales de la audición**

El ser humano es capaz de detectar aquellos sonidos que se encuentren dentro de un determinado rango de amplitudes y frecuencias. El rango de frecuencias asignado convencionalmente al sistema auditivo humano va desde los 20 Hz hasta los 20 kHz; no obstante, este rango puede variar de una persona a otra en función de la edad, de trastornos auditivos o de una pérdida de sensibilidad (temporal o permanente).

La siguiente figura ilustra el área de audición humana:

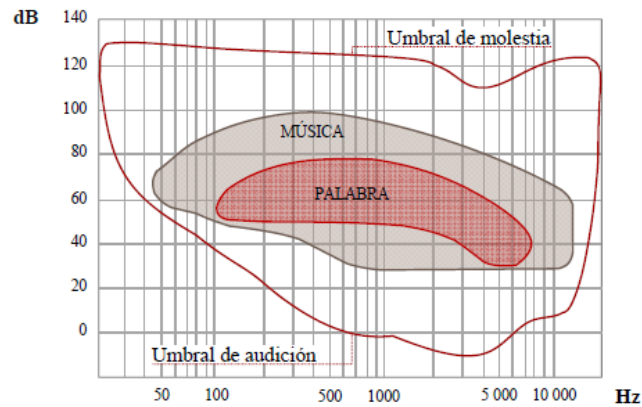


Figura 1.2 Área de audición humana [17]

Por lo general, los umbrales de la audición son fáciles de medir y corresponden al mínimo nivel que un determinado estímulo debe tener para provocar una reacción en el sujeto bajo ensayo. Existen dos tipos diferentes de umbrales: el umbral absoluto y el umbral diferencial.

El umbral absoluto es la mínima intensidad de un estímulo para la cual en un 50% de los intentos el sujeto considera que el estímulo está presente. Es necesario especificar las condiciones en las cuales se determina el umbral. Por ejemplo, para el umbral absoluto de frecuencia debe indicarse la intensidad del sonido, si el sujeto se encuentra en un recinto acústicamente aislado, si está descansando auditivamente, etc. Son dos los métodos que existen para determinar este tipo de umbral: el método de mínimos cambios y el de los estímulos constantes.

El método de mínimos cambios consiste en acercarse gradualmente de manera ascendente hasta que el sujeto exprese que el estímulo está presente, y luego, descendientemente, bajando hasta que el sujeto indique que el estímulo no está presente. Finalmente se promediarán los valores que el sujeto ha declarado.

En el método de los estímulos constantes, el experimentador escoge un número constante de estímulos, que van desde estímulos fácilmente detectables hasta estímulos débiles, y los presenta en orden aleatorio y de forma constante. El umbral es determinado con el valor que el sujeto indique como presente un 50% de las veces.

Respecto al umbral diferencial, es la mínima intensidad con que un estímulo debe exceder a otro para que el sujeto los reconozca como diferentes en un 50% de las pruebas. Al igual que en el caso anterior, son importantes las condiciones de ensayo, entre las cuales debe especificarse la intensidad del estímulo más débil. Para la determinación del umbral diferencial pueden utilizarse los dos métodos anteriores, o bien el método del error promedio. En este, el sujeto controla la intensidad del estímulo variable y la ajusta hasta hacerla “igual” a la de un estímulo fijo. El error promedio cometido es el umbral diferencial.

Cabe notar que los umbrales no son valores perfectamente determinados. No solo los diversos métodos pueden arrojar valores diferentes sino que además un mismo método puede variar de un momento a otro, ya que el sujeto puede cansarse, o bien agudizar su percepción al realizar más intentos.

#### **1.4.2 Enmascaramiento sonoro**

El enmascaramiento sonoro es otro de los parámetros estudiados en psicoacústica. Se puede definir como un proceso en el cual el umbral de audibilidad correspondiente a un sonido se eleva debido a la presencia de otro sonido, es decir, el proceso en el que un sonido impide la percepción de otro. Podemos apreciar frecuentemente este fenómeno, por ejemplo, cuando dos personas conversan y el sonido urbano impide que una escuche total o parcialmente lo que dice la otra persona.

El enmascaramiento depende del nivel de presión de las señales enmascarante y enmascarada, así como de la separación en frecuencia y en tiempo entre las mismas. Existen básicamente dos tipos de enmascaramiento, el enmascaramiento simultáneo y el enmascaramiento no simultáneo.

- **Enmascaramiento simultáneo**

Este tipo de enmascaramiento se presenta cuando el sonido de prueba y el sonido enmascarante coinciden temporalmente.

- **Enmascaramiento no simultáneo**

El enmascaramiento no simultáneo es aquel que se produce cuando el sonido de prueba no se superpone temporalmente con el sonido enmascarador, distinguiéndose entonces dos tipos de enmascaramiento no simultáneo: pre-enmascaramiento y post-enmascaramiento.

- **Pre-enmascaramiento**

Es un fenómeno inesperado, pues pareciera implicar que el sistema auditivo es no causal: una señal puede enmascarar a otra antes de ser aplicada. En otras palabras, sonidos que aún no existen pueden enmascarar sonidos ya existentes, algo difícil de imaginar.

Sin embargo, un estudio más minucioso permite justificar la existencia del pre-enmascaramiento. Para ello, tenemos que recordar que cualquier sensación, y en este caso la sensación sonora, no se produce instantáneamente, sino que se requiere de un cierto tiempo para que se origine. De tal forma que diversos estudios han revelado que las señales de gran intensidad requieren de un tiempo de formación de la sensación menor que el de las señales de baja intensidad. Esto último quiere decir que si después

de una señal de baja intensidad se presenta una de gran intensidad, la sensación asociada a la primera puede ser enmascarada. El fenómeno de pre-enmascaramiento dependerá de la relación de tiempo entre el sonido de prueba y el sonido enmascarante.

La comprensión que se tiene del pre-enmascaramiento es muy vaga, ya que los resultados experimentales obtenidos solo son reproducibles con sujetos altamente entrenados, y en muchos casos no permiten concluir con certeza acerca de sus propiedades.

No obstante, se sabe que este fenómeno se extiende hasta unos 20 ms antes de la aparición de la señal enmascarante, independientemente del nivel de esta.

- Post-enmascaramiento

El post-enmascaramiento, por el contrario, es un efecto fácil de medir aún en sujetos no entrenados. Por regla general, se determina experimentalmente mediante señales de prueba de corta duración, aplicadas luego de una señal enmascarante de duración variable. El efecto de post-enmascaramiento existe durante un intervalo máximo de unos 200 ms después de la desaparición de la señal enmascarante, presentándose también para sonidos de prueba de unas pocas centenas de milisegundos.

La siguiente figura muestra las regiones temporales en las cuales ocurren los fenómenos de pre-enmascaramiento, post-enmascaramiento y enmascaramiento simultáneo, así como la evolución en el tiempo de los mismos.

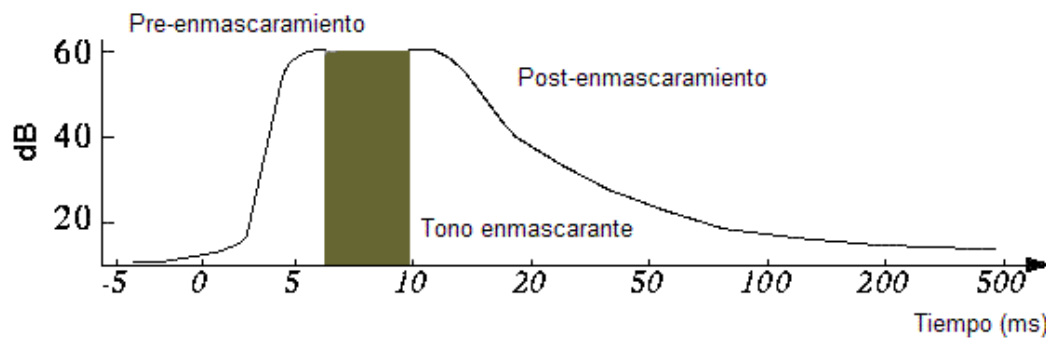


Figura 1.3 Nivel de sensación de una señal de prueba apenas audible en función del tiempo

Una magnitud muy útil para medir la magnitud del enmascaramiento es el umbral de enmascaramiento, definido como “el nivel de presión sonora de un sonido de prueba necesario para que este sea apenas audible en presencia de una señal enmascarante”.

### 1.4.3 Bandas críticas

Las bandas críticas son rangos de frecuencia dentro de los cuales un tono bloquea la percepción de otro tono.

Las siguientes figuras nos permiten comprender mejor el concepto de banda crítica.

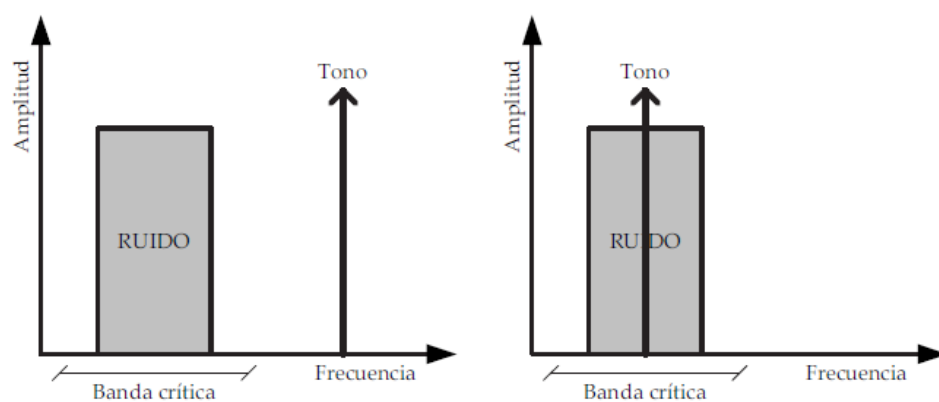


Figura 1.4 Representación de un tono enmascarado



En la figura de la izquierda se puede observar como el tono no será enmascarado por el ruido de banda angosta ya que este está fuera de la banda crítica, motivo por el cual el umbral de enmascaramiento del tono seguirá siendo el mismo que si el ruido no existiera e independientemente del nivel sonoro del ruido. En la segunda figura, a la derecha, contrariamente a la primera, tenemos al tono enmascarado por el ruido, el cual está centrado en la frecuencia del tono. En este caso, el umbral de enmascaramiento se verá afectado y aumentará en función del aumento del ancho de banda del ruido, sin embargo, existe un punto a partir del cual el aumento del ancho de banda del ruido no cambiará el umbral de enmascaramiento del tono, siendo este ancho de banda el ancho de banda crítico.

Mientras que el umbral diferencial representa la capacidad del sistema auditivo de detectar la mínima variación en una sola frecuencia, la banda crítica determina la capacidad de resolución del oído para dos o más frecuencias simultáneas.

De ahí que se define la banda crítica como aquel intervalo de frecuencias que representa la máxima resolución en frecuencia del sistema auditivo en diferentes experimentos psicoacústicos. También se suele decir que las bandas críticas constituyen el intervalo en el cual se “suma” la energía de las distintas componentes espectrales de la señal.

#### **1.4.4 Sonoridad**

La sonoridad es un parámetro perceptivo fundamental del sonido. Es el atributo que nos permite ordenar sonidos en una escala del más fuerte al más débil. La sonoridad o sensación de intensidad es propia de la presión acústica; cuanto más alta es la presión, más intenso parece el sonido, por lo cual, es indicativa del grado de amplificación que produce un recinto sobre un mensaje oral emitido. Pese a ello, la sonoridad no depende

sólo de su intensidad sino también de su frecuencia, del ancho de banda, del contenido espectral y de la duración del sonido, de manera que al igual que con otras magnitudes psicológicas se debe prestar especial atención a las condiciones en que se determina o especifica.

Los instrumentos de medida utilizados para medir niveles de presión sonora son los sonómetros. Estos tienen unos filtros de ponderación para acomodarse a la sensibilidad del oído, donde el filtro A es para sonidos débiles, el B para sonidos medios y el C para sonidos intensos, aunque el que se utiliza habitualmente es el filtro A por ser este el complementario del umbral de audición. El dB (A) es la unidad con la que se expresa un nivel de presión acústica cuando se ha sometido a la ponderación del filtro (A) de los sonómetros.

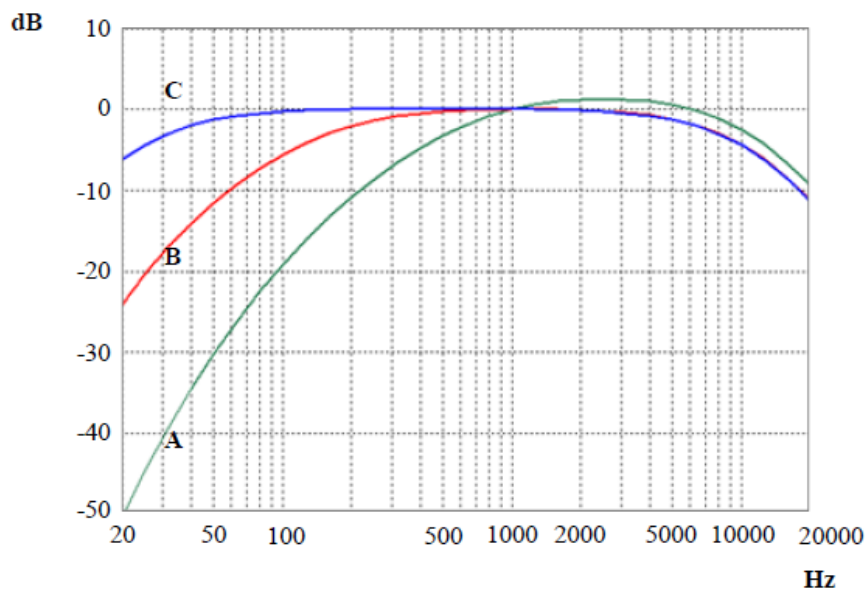


Figura 1.5 Curvas de ponderación de un sonómetro

## **Capítulo II. Acústica arquitectónica.**

## **Capítulo II. Acústica arquitectónica.**

### **2.1 Preámbulo**

La acústica arquitectónica estudia los fenómenos vinculados con una propagación adecuada, fiel y funcional del sonido en un recinto, ya sea una sala de conciertos, un aula, un estudio de grabación...

Todo planteamiento acústico conlleva una serie de factores que afectan al aislamiento, generación, transmisión, absorción, reflexión, difusión y finalmente, a la escucha del sonido.

Este proyecto se centra en el acondicionamiento acústico, cuyo objetivo es proporcionar la máxima calidad acústica posible al mensaje sonoro emitido en una sala, el cual debe ser lo suficientemente claro y tener la intensidad necesaria para asegurar una correcta comprensión del mismo.

### **2.2 Espacios destinados a la palabra**

Son numerosos los espacios destinados a la audición de la voz, ejemplo de ello son los teatros, salas de conciertos, templos, aulas, etc., en los cuales el mensaje hablado es la herramienta principal.

El principal objetivo que se pretende conseguir en este tipo de recintos es garantizar la existencia de confort acústico, para asegurar así una correcta inteligibilidad de la palabra.

El hecho de que exista confort acústico significa que el campo sonoro existente no generará ninguna molestia significativa a las personas o espectadores presentes en el recinto considerado. Además, la existencia de confort acústico también es indicativa de

que el grado de inteligibilidad será alto. La obtención de una correcta inteligibilidad de la palabra es imprescindible en todos aquellos recintos donde la comprensión del mensaje oral sea de capital importancia.

Para conseguir un adecuado confort acústico, a la vez que una correcta inteligibilidad de la palabra, es preciso que el ruido de fondo existente en la sala sea suficientemente bajo, el nivel de campo reverberante sea, igualmente, suficientemente bajo y no existan ecos ni focalizaciones del sonido.

### **2.2.1 Aulas**

La capacidad de escuchar y entender lo que se dice en un aula es imprescindible para garantizar un correcto aprendizaje. Una mala acústica puede producirse por un aislamiento o acondicionamiento acústico no adecuados. Un elevado nivel de ruido de fondo o unas condiciones arquitectónicas del recinto determinadas pueden dificultar la comprensión del mensaje hablado.

En estos casos, el rendimiento académico puede verse comprometido, pues disminuye la comprensión del habla, aparecen signos de fatiga en el docente costándole mantener la concentración e incluso se crean problemas de atención en el alumnado.

Por ello, es evidente que en cualquier establecimiento, en este caso universitario, donde el mensaje hablado es primordial, se debe conseguir que las condiciones arquitectónicas de las aulas sean tales que:

- Protejan de los ruidos intrusivos.
- Amplifiquen y distribuyan equilibradamente la energía sonora del mensaje sonoro emitido.
- No alteren la composición espectral del mensaje emitido original.

- No introduzcan reflexiones inadecuadas con paredes, suelo y techo que interfieran con el mensaje original.

En resumen, que se creen lugares que inviten y favorezcan la conversación.

- **Evolución histórica de las aulas de enseñanza**

Con suficiente aproximación se puede afirmar que en el siglo XIX surge el nacimiento de la escuela como edificio, sin embargo, no tal y como hoy se conciben sino como una adaptación de otras formas de arquitectura, dejando de lado las necesidades de la enseñanza.

Los gobiernos de las naciones europeas propugnaron la instrucción popular y como consecuencia de ello florecieron las iniciativas disciplinares y la organización de cursos escolásticos, dando lugar a la construcción de escuelas.

Dichas escuelas, en sus inicios, constaban de una gran sala donde se ubicaban los alumnos sin distinción de sexo ni edad, y la instrucción era impartida por un maestro y algún ayudante joven o alumno aventajado cuando el grupo era numeroso. Tiempo después, debido al considerable incremento del alumnado se hacía imposible mantener la disciplina en la sala, por lo que se fueron añadiendo aulas más pequeñas alrededor de la gran sala, separadas de esta mediante cortinas o puertas correderas.

Los arquitectos de aquella época se limitaban a enfatizar la forma y el estilo, olvidándose de los aspectos funcionales.

A partir de la segunda mitad del siglo XIX, es la arquitectura norteamericana la que enarbola la bandera de la renovación arquitectónica. Louis Sullivan, notable arquitecto de la Escuela de Chicago enuncia un principio fundamental de la arquitectura moderna: “form follows function” (“la forma sigue a la función”). Esta nueva actitud de

los arquitectos, junto con una planificación de las escuelas por barrio, una separación por grados en distintos edificios y una buena disposición administrativa, dan como fruto la construcción de escuelas que ya no parecen palacios, y que están exentas de reminiscencias y semejanzas con la arquitectura del pasado. Son escuelas conformadas como tal. En Europa, la construcción de las primeras escuelas no se conseguirá hasta 1925.

A pesar de todo esto, la planificación escolar americana fracasó. Fue debido al crecimiento desenfrenado y caótico al que estaban sometidas las ciudades, que llegaba a limitar el espacio escolar, rodeándolo de edificios y calles ruidosas. En el caso de los ingleses, la situación fue similar a la americana, donde además las condiciones higiénicas y lumínicas dejaban mucho que desear.

Son los alemanes, quienes desde su punto de vista más racional y ordenado dan un nuevo enfoque al concepto de escuela. A partir de entonces empieza a surgir la necesidad de organización de orden interno, lo cual considera aspectos como la separación de sexos, el número de alumnos por superficie construida, el volumen de aire por alumno, condiciones de higiene, iluminación...

En líneas generales, la arquitectura escolar evoluciona a la par de los avances urbanísticos de cada país y de su estabilidad política. Es en el siglo XX cuando se logra definitivamente la inserción de las escuelas dentro de la trama urbana, centrándose en los aspectos funcionales y mejorando las condiciones higiénicas y de iluminación.

## **2.3 Elementos de la comunicación**

Todos los lugares destinados a la transmisión de mensajes sonoros llevan implícita la conocida cadena de comunicación, donde existe un emisor, en el caso que

nos ocupa sería el docente; un receptor o receptores, en este caso, los alumnos, y un canal de transmisión, el cual está definido por las características físicas del lugar y las diversas vías de propagación del sonido que existen en el aula.

### **2.3.1 Emisor**

El emisor está constituido por la fuente sonora junto con los sonidos que emite. Es el encargado de codificar el mensaje y transmitirlo por medio de un canal de transmisión hasta el receptor.

El mensaje sonoro constituido por la palabra hablada consiste en una sucesión de sonidos que varía constantemente en intensidad y frecuencia. Las características acústicas de la señal sonora correspondientes a la palabra pueden resumirse en lo siguiente:

- Los fonemas (mínimo fragmento con identidad fonética propia), que constituyen el lenguaje hablado, se dividen en vocales y consonantes.
- Las consonantes confieren mayor cantidad de información que las vocales y tienen su energía principalmente en alta frecuencia.
- Las vocales tienen su energía principalmente en baja frecuencia; son más intensas que las consonantes y tienen una duración mayor.

Es en las altas frecuencias donde se desarrollan la mayoría de las consonantes, las cuales al ser sonidos de corta duración y poca energía proporcionan más información que las vocales a la hora de entender un mensaje hablado. Es por ello que la comprensión de las consonantes es fundamental para la inteligibilidad de la palabra, de ahí que sea más importante la preservación de las altas frecuencias para la comprensión de mensajes hablados que las bajas frecuencias.



En la siguiente figura se puede observar la energía sonora correspondiente a la emisión de una vocal seguida de una consonante en función del tiempo.

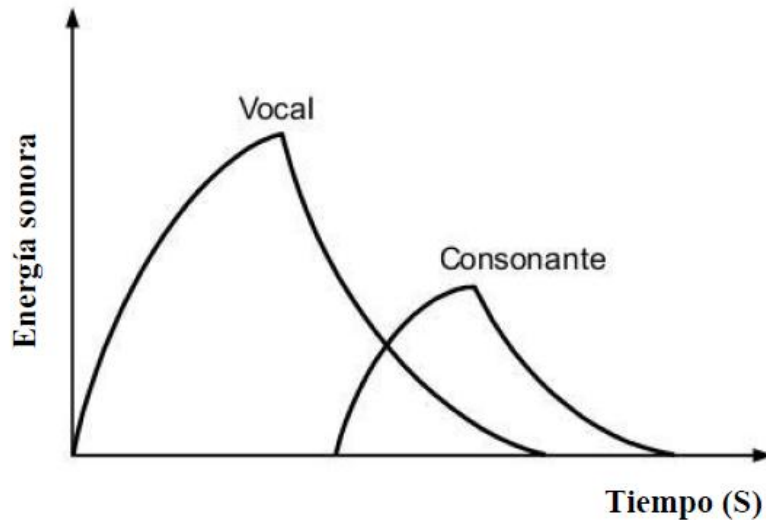


Figura 2.1 Evolución temporal de la energía sonora correspondiente a la emisión de una vocal seguida de una consonante en un recinto cerrado [7]

En cuanto a la directividad, en general, cualquier fuente sonora radia más potencia en unas direcciones que en otras y, por tanto, presenta una cierta directividad. Dicha directividad depende de la frecuencia y aumenta con la misma.

La manera de expresar la directividad de una fuente sonora en un punto cualquiera del espacio es mediante el denominado factor de directividad  $Q$ . El factor  $Q$  depende de la relación entre el nivel de presión sonora producido por dicha fuente en la dirección considerada y el nivel que se obtendría si la fuente no fuese direccional. Cuanto mayor sea el nivel de presión sonora en una dirección determinada, mayor será el valor de  $Q$  en dicha dirección.

En el caso de la voz humana, la energía procedente del mensaje hablado no se irradia uniformemente alrededor del orador debido a la sombra acústica que produce la cabeza y cuerpo del mismo. Las altas frecuencias se irradian en un estrecho ángulo

sólido frente al orador, mientras que las frecuencias bajas lo hacen más uniformemente. De ahí que un oyente situado al lado o detrás del orador tenga mayor dificultad en entender el sonido hablado, ya que faltan gran parte de las componentes de alta frecuencia del habla emitida.

### **2.3.2 Canal de transmisión**

En el caso que nos ocupa, el canal de transmisión estaría constituido por el aula y las diversas vías de propagación del sonido que existen en ella.

La energía radiada por una fuente sonora en un recinto cerrado llega a un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo de dos formas diferentes: una parte de la energía llega de forma directa (sonido directo), es decir, como si fuente y receptor estuviesen en el espacio libre, mientras que la otra parte lo hace de forma indirecta (sonido reflejado), pues está asociada a las sucesivas reflexiones que sufre la onda sonora cuando incide sobre las diferentes superficies del recinto.

En un punto cualquiera del recinto, la energía correspondiente al sonido directo depende exclusivamente de la distancia a la fuente sonora, mientras que la energía asociada a cada reflexión depende del camino recorrido por el rayo sonoro, así como del grado de absorción acústica de los materiales utilizados como revestimientos de las superficies implicadas.

El campo directo disminuye con la distancia a la fuente, y lo hace a razón de 6 dB por cada duplicación de la distancia. Así, si a 1 m de una fuente sonora se mide un nivel de presión sonora de 80 dB, a 2 m (el doble de 1 m) tendremos 74 dB; a 4 m (el doble de 2 m) habrá 68 dB; a 8 m (el doble de 4 m) existirá un campo directo de 62 dB, y así sucesivamente.

El campo reverberante, en cambio, es constante en los ambientes cerrados, como habitaciones, salas y otros recintos. Esto se debe a que el sonido sufre multitud de reflexiones, y todas ellas se superponen entre sí, resultando una distribución prácticamente uniforme del sonido.

Lógicamente, cuanto mayor sea la distancia recorrida y más absorbentes sean los materiales empleados, menor será la energía asociada tanto al sonido directo como a las sucesivas reflexiones.

La distancia para la cual el nivel de presión sonora del campo directo ( $L_D$ ) es igual al nivel de presión sonora del campo reverberante ( $L_R$ ) se denomina distancia crítica ( $D_C$ ).

Centrándonos más en el sonido indirecto, al analizar la evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera del recinto objeto de estudio, se observan básicamente dos zonas de características notablemente diferenciadas: una primera zona que engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo, y que reciben el nombre de primeras reflexiones o reflexiones tempranas (“early reflections”), y una segunda formada por reflexiones tardías que constituyen la denominada cola reverberante.

Si bien la llegada de reflexiones al punto en cuestión se produce de forma continua, y por tanto sin cambios bruscos, también es cierto que las primeras reflexiones llegan de forma más discretizada que las tardías, debido a que se trata de reflexiones de orden bajo (habitualmente, orden  $\leq 3$ ). Se dice que una reflexión es de orden “n” cuando el rayo sonoro asociado ha incidido “n” veces sobre las diferentes superficies del recinto antes de llegar al receptor.

Desde un punto de vista práctico, se suele establecer un límite temporal para la zona de primeras reflexiones de aproximadamente 100 ms desde la llegada del sonido directo, aunque dicho valor varía en cada caso concreto en función de la forma y del volumen del recinto.

Dentro de la zona de primeras reflexiones aparece el eco, un fenómeno muy común en acústica.

- **Eco**

El oído integra las reflexiones que le llegan en los primeros 50 ms y, en consecuencia, su percepción no es diferenciada respecto del sonido directo. Como podemos observar en la Figura 2.2, esas reflexiones tempranas contribuyen de manera positiva a la comprensión del mensaje oral mejorando la inteligibilidad. En cambio, una reflexión será contraproducente si llega con un nivel elevado después de esos 50 ms. Esto es lo que se denomina eco.

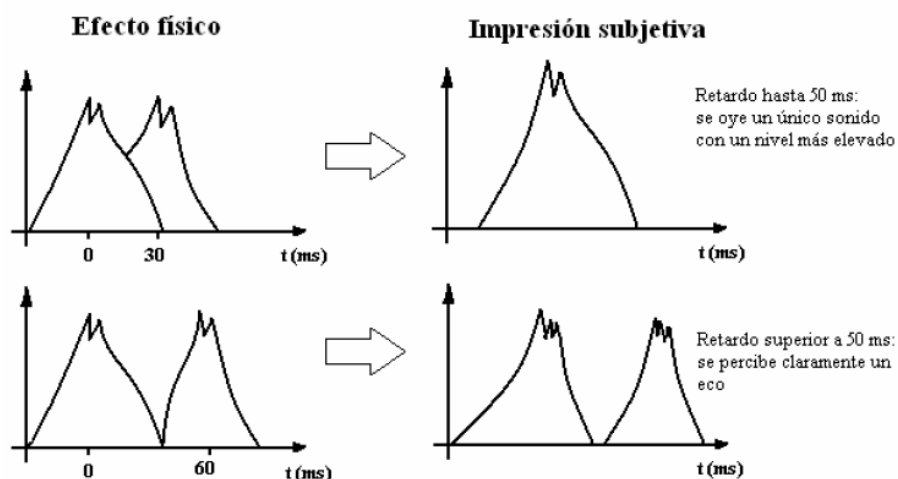


Figura 2.2 Impresión subjetiva de dos sonidos con diferentes retardos [7]

Por tanto, podemos ver que hay dos factores fundamentales que influyen en la aparición de ecos: el retardo con el que llega la reflexión al oyente y la diferencia de

nivel entre el sonido directo y el reflejado. Las relaciones entre ellos se resumen en la siguiente figura:

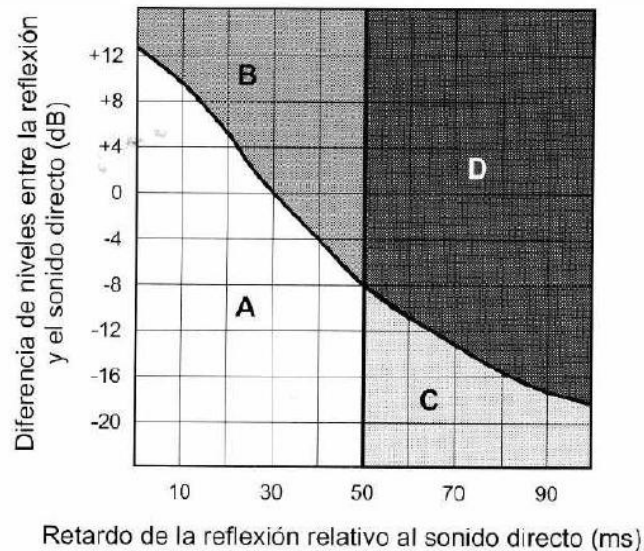


Figura 2.3 Relación entre el retardo y el nivel de sonido directo-reflejado [7]

En la zona A, la reflexión llega antes de 50 ms; por tanto, si llega con un nivel aceptable será integrada por el oído, produciéndose un aumento de la inteligibilidad y de la sonoridad. Por el contrario, en la zona B, a pesar de llegar antes de 50 ms, lo hace con un nivel relativo más elevado, por lo que se producirá un desplazamiento de la localización de la fuente sonora hacia la superficie generadora de la reflexión. Por el contrario (zona C), a pesar de llegar después de 50 ms la influencia de la reflexión, no será perjudicial debido a que su nivel relativo es bajo. Finalmente, en caso de que dicho nivel sea elevado, como en el caso D, se percibirá eco y, por tanto, tendremos una pérdida en la inteligibilidad de la palabra.

Cabe mencionar que en la figura se considera la posibilidad de que una reflexión pueda presentar un nivel mayor que el de la señal directa, ya que en este contexto una reflexión también se puede entender como un sonido secundario (que llega después del sonido directo) procedente de un altavoz de refuerzo en sistemas de refuerzo sonoro.

La representación gráfica temporal de la llegada de las diversas reflexiones, acompañadas de su nivel energético correspondiente, se denomina ecograma o reflectograma. En la figura 2.4 se representa de forma esquemática la llegada de los diferentes rayos sonoros a un receptor junto con el ecograma asociado, con indicación del sonido directo, la zona de primeras reflexiones y la zona de reflexiones tardías (cola reverberante).

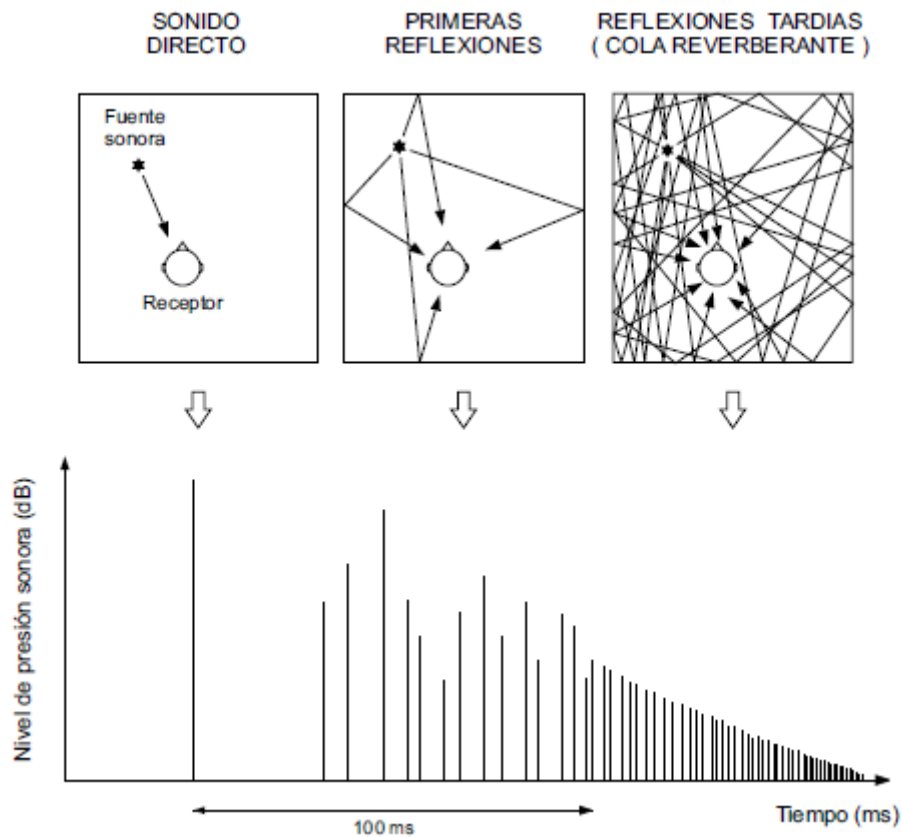


Figura 2.4 Representación del sonido directo, primeras reflexiones y reflexiones tardías junto con el ecograma asociado [7]

### 2.3.3 Receptor

En nuestro caso, el receptor está constituido por los oyentes, los cuales califican la calidad acústica de un local. Este juicio depende del tipo de mensaje emitido según el uso de la sala.

Existen algunos factores que condicionan la respuesta del receptor frente a la percepción de mensajes sonoros, estos dependerán del tipo de información de cada mensaje, sea el caso de la información semántica, la cual es propia del mensaje oral, o de la información estética, propia del mensaje musical.

Para la calificación de la percepción de mensajes orales, se considera criterio básico la inteligibilidad, es decir, dicho mensaje debe tener la intensidad suficiente para emerger del ruido de fondo y a la vez conseguir el equilibrio necesario entre la pérdida de claridad, debido al excesivo sonido reflejado y la pérdida de intensidad, debida a la excesiva absorción por parte de la sala.

En los recintos dedicados a la audición de la palabra es importante que el espectro del sonido recibido sea lo más similar posible al espectro del sonido emitido. De ahí la importancia del sonido directo y las primeras reflexiones.

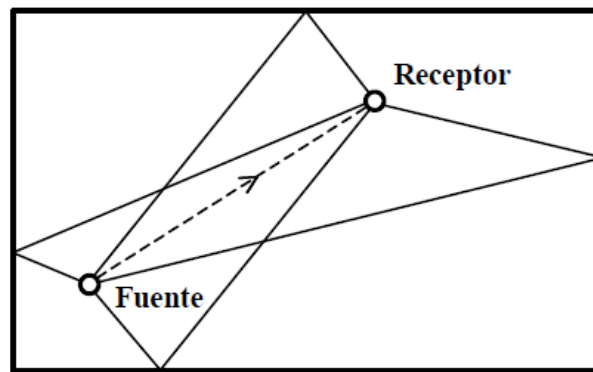


Figura 2.5 Representación del sonido directo (línea discontinua) y sonido indirecto (línea continua) que recibe el receptor

## 2.4 Acústica geométrica

Profundizando un poco más en la propagación del sonido en un recinto nos adentramos en la teoría geométrica.

En general, como se comentó anteriormente, las primeras reflexiones presentan un nivel energético mayor que las correspondientes a la cola reverberante, ya que son de orden más bajo. Además, por el hecho de depender directamente de las formas geométricas de la sala, son específicas de cada punto y, por tanto, determinan las características acústicas propias del mismo, junto con el sonido directo.

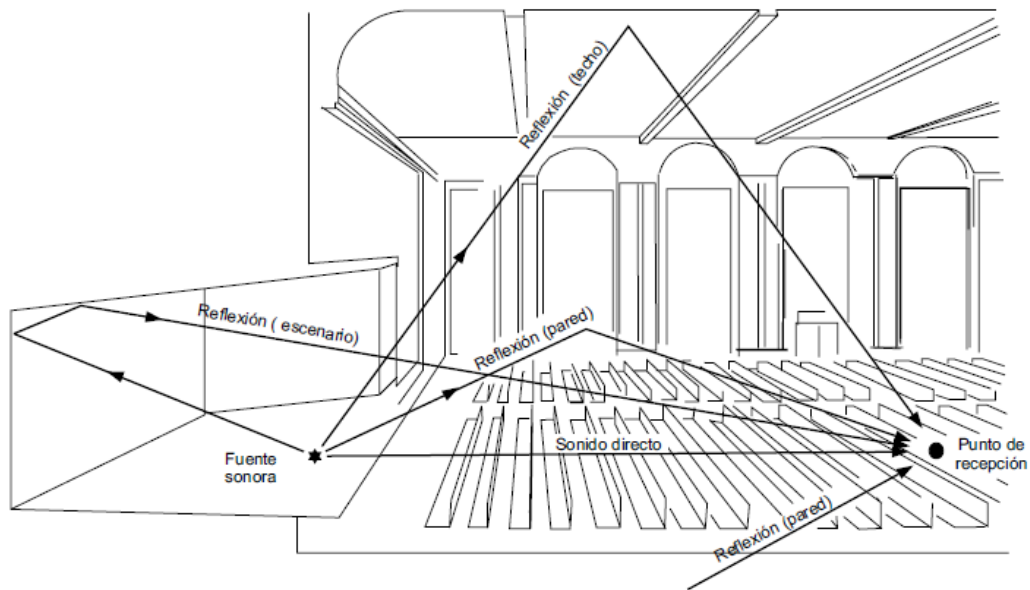


Figura 2.6 Ejemplo de llegada del sonido directo y de las primeras reflexiones a un receptor [7]

La hipótesis elemental de partida para calcular el ecograma asociado a un punto cualquiera consiste en tratar los rayos sonoros como si se tratase de rayos de luz, es decir, considerando que las reflexiones de los mismos sobre las distintas superficies son totalmente especulares y que, por tanto, verifican la ley de la reflexión. En la siguiente figura se representa gráficamente dicha ley.



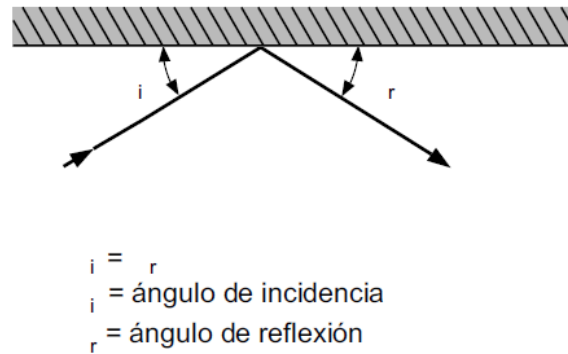


Figura 2.7 Reflexión especular del sonido sobre una superficie [7]

El análisis acústico basado en la hipótesis de reflexiones especulares constituye la base de la denominada acústica geométrica. Evidentemente, dicho análisis no es más que una aproximación a la realidad, ya que sólo en determinadas circunstancias la hipótesis de reflexión especular es totalmente veraz.

Para que en la práctica se produzca una reflexión marcadamente especular es necesario que se cumplan los siguientes requisitos, en lo que a la superficie de reflexión se refiere:

- Dimensiones grandes en comparación con la longitud de onda del sonido en consideración.
- Superficie lisa y muy reflectante (poco absorbente).

En el caso de que las dimensiones sean menores o similares a la longitud de onda del sonido, la onda sonora rodea la superficie y sigue propagándose como si el obstáculo que representa la misma no existiese. Dicho fenómeno se conoce con el nombre de difracción.

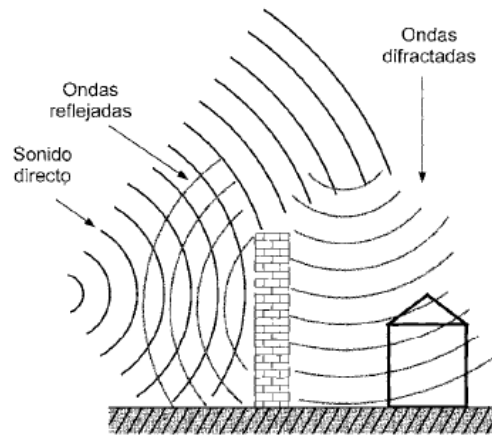


Figura 2.8 Ejemplo de difracción del sonido alrededor de una barrera acústica instalada delante de una vivienda a modo de protección frente al ruido

Por otra parte, si la superficie presenta irregularidades de dimensiones comparables con la longitud de onda, se produce una reflexión de la onda incidente en múltiples direcciones. Dicho fenómeno se conoce con el nombre de difusión del sonido.

Por otro lado, como se ha comentado anteriormente, la cola reverberante está formada por las reflexiones tardías (por regla general se consideran las reflexiones de orden superior a 3). Debido a que la densidad temporal de reflexiones en un punto cualquiera de un recinto cerrado aumenta de forma cuadrática con el tiempo, existe una gran concentración de dichas reflexiones en cualquier punto de recepción y, además, sus características son prácticamente iguales, con independencia del punto considerado. Es por ello que el estudio de la cola reverberante se efectúa siempre mediante criterios basados en la denominada acústica estadística, en lugar de la acústica geométrica.

#### 2.4.1 Formas

La forma es la principal característica geométrica que afecta al comportamiento acústico dentro de un recinto. Esta debería permitir que el recorrido del sonido fuese corto, acercando así al espectador lo máximo posible a la fuente. En el caso de espacios

destinados a la palabra, las salas deberán ser diseñadas de tal forma que los sonidos hablados puedan ser preservados en la transmisión orador-oyente.

Muchos recintos emplean la forma rectangular para la escucha de los mensajes hablados, la cual se emplea solo si el tiempo de reverberación es corto y la sala es pequeña. En caso de que sean grandes, el diseño geométrico cambia debido a la posibilidad de existencia de eco flotante. En este caso se emplea la forma trapezoidal, es decir, las superficies laterales no serán paralelas, al igual que el techo y el suelo.

#### **2.4.1.1 Superficies planas**

- **Paredes laterales**

En la figura que se muestra a continuación se representan las primeras reflexiones en tres salas distintas geométricamente. Sólo en la primera de ellas las paredes laterales son paralelas. En el caso a) los rayos reflejados se dirigen hacia la segunda mitad de la sala, en b) los rayos reflejados distribuyen la energía de forma más uniforme en toda la sala, incluso en los asientos más cercanos a la fuente sonora, sin embargo, en c), los rayos se dirigen al fondo de la misma, reforzando el nivel sonoro en la zona con el sonido directo más débil.

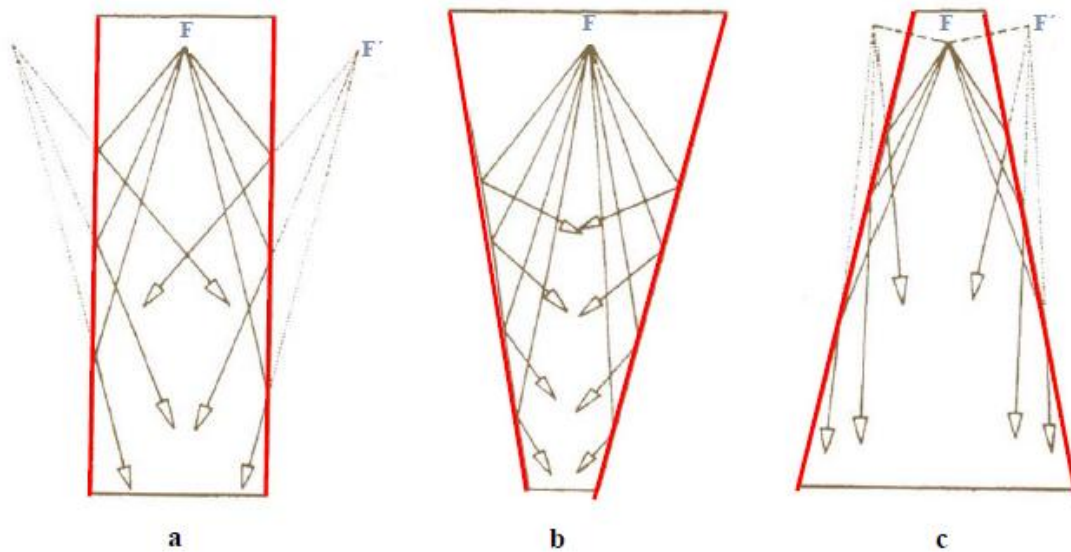


Figura 2.9 Primeras reflexiones de las paredes laterales de una sala [17]

- **Pared frontal y pared del fondo**

Las superficies próximas al escenario deberán reforzar la voz del orador mientras que la pared del fondo debería orientarse de tal forma que las reflexiones con gran retardo (posible existencia de eco) no lleguen a la audiencia, u otra opción sería recubrirla con materiales absorbentes.

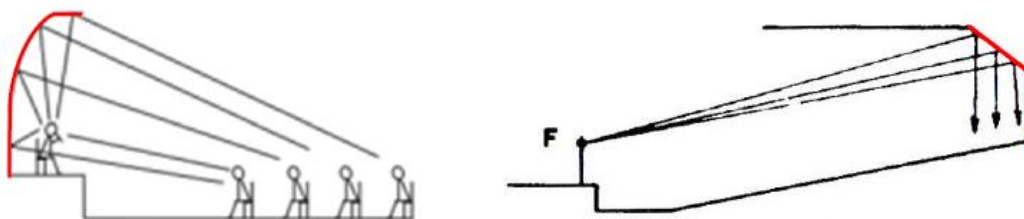


Figura 2.10 Primeras reflexiones de la pared frontal y pared del fondo [17]

- **Techo y suelo**

En salas grandes, la inclinación del techo y suelo es necesaria para que las primeras reflexiones se dirijan a las zonas del público más necesitadas de las mismas sin obstáculo alguno.

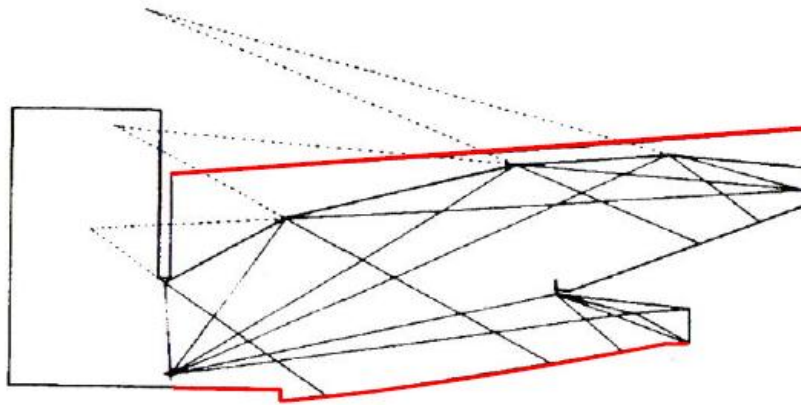


Figura 2.11 Primeras reflexiones del techo y suelo [17]

#### 2.4.1.2 Superficies curvas

Las superficies curvas se clasifican en dos tipos: cóncavas y convexas. Las superficies cóncavas pueden presentar a menudo irregularidades importantes en el campo sonoro debido a las concentraciones locales de energía.

- **Esfera**

Como se observa en la figura 2.12, cuando el rayo es perpendicular a la superficie de la esfera, este se refleja según su misma dirección.

Si la fuente se encuentra sobre o muy cerca de la superficie, los rayos reflejados cuyo recorrido coincida con el lado de uno de los infinitos polígonos regulares inscribibles en ella, regresarán al punto de partida después de algunas reflexiones. Sin embargo, en el centro de dicha superficie «O» no se percibirá sonido alguno. Esto suele

ocurrir en superficies de tipo cilíndrico o esférico como es el caso de las galerías de los susurros.

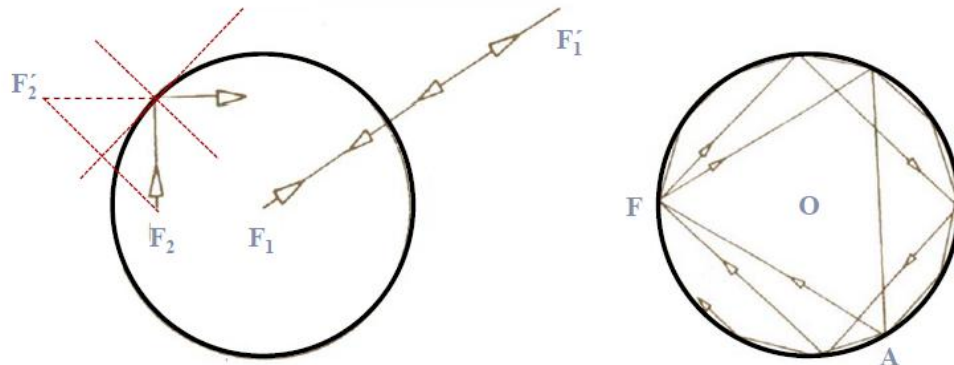


Figura 2.12 Reflexiones sobre una superficie curva [17]

- **Elipse**

Una propiedad de las superficies cóncavas es la existencia de focos conjugados, de tal forma que emitiendo sonido en uno de ellos, las reflexiones se focalizan en el otro. La elipse es un ejemplo de ello. En la figura que se muestra a continuación se pueden observar las distintas reflexiones y la existencia de focos conjugados. Se observa cómo emitiendo sonido en uno de ellos (F) las reflexiones se focalizan en el otro (F'). Dichos focos conjugados se encuentran a la misma distancia de separación del contorno.

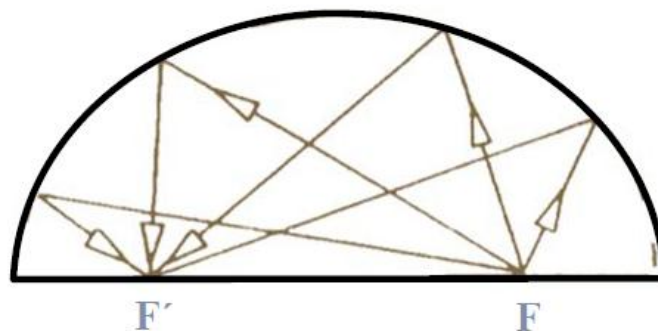


Figura 2.13 Reflexiones sobre una elipse y focalizaciones [17]

- **Parábola**

Todo rayo que parte del foco es reflejado paralelamente al eje y todo rayo que incide en la parábola, paralelo al eje, se refleja pasando por el foco.

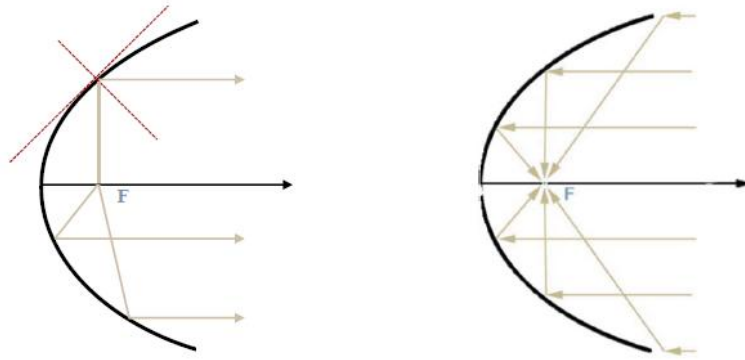


Figura 2.14 Reflexiones sobre una parábola y focalizaciones [17]

Tanto en las superficies esféricas, elípticas como parabólicas se pueden observar los fenómenos de concentración de energía que supone toda superficie cóncava. Dicho fenómeno puede ocasionar graves defectos en la homogeneidad acústica de una sala, por lo cual se debería evitar su uso.

Por el contrario, las superficies convexas implican una dispersión o difusión sonora. Por ello, en caso de existir alguna superficie cóncava dentro de un recinto objeto de estudio, se debería recubrir dicha superficie con material absorbente o de superficies convexas superpuestas, para que dirijan las reflexiones en todas direcciones.

Existe una regla sencilla para determinar si una superficie cóncava ocasionará problemas o no; solo hemos de completar el círculo parcial. Si dentro del círculo completo no están ni la fuente ni el punto receptor, entonces no debemos esperar problemas de enfoque.

## 2.5 Materiales y mecanismos de acondicionamiento acústico

La corrección acústica tiene como objetivo adaptar la calidad acústica de un recinto al uso que se le va a dar. Permite:

- Mejorar la calidad de la escucha del recinto (cine, aula, salón de conferencias...) hasta convertirla en confortable.
- Reducir el nivel sonoro de un recinto ruidoso (taller, comedor) para hacerlo soportable.

La corrección acústica se hace mediante la elección adecuada de los materiales y mecanismos de acondicionamiento acústico, teniendo en cuenta su coeficiente de absorción, el volumen del local y el tiempo de reverberación ideal.

La elección de los materiales y mecanismos que se van a utilizar como revestimiento es esencial para la obtención de un buen diseño acústico de un recinto. Dependiendo a qué se destinen los espacios que se van a diseñar, resulta necesario potenciar la aparición de primeras reflexiones, conseguir una buena difusión del sonido o por el contrario, conseguir la absorción del sonido. Todos los materiales absorben la energía sonora en mayor o menor medida. En todos los casos, una parte se refleja, otra se disipa en el aire en forma de calor (este efecto es más apreciable en altas frecuencias) y el resto del sonido penetra en el material, cambiando su dirección por tratarse de uno más denso, y disipando parte de su energía nuevamente en calor.

Así pues, podríamos clasificar los materiales y mecanismos de acondicionamiento acústico en cuatro grupos:

- Absorbentes: para minimizar la reverberación de la sala.
- Resonadores: para disminuir la reverberación en determinadas frecuencias.



- Reflectores: para aumentar el número de primeras reflexiones enfocadas hacia el público.
- Difusores: para conseguir una distribución del sonido más uniforme.

Pasamos a ver un poco más en detalle cada uno de estos materiales y mecanismos:

### **2.5.1 Absorbentes**

Como ya se ha comentado anteriormente, aunque todos los materiales tienen asociada una determinada capacidad de absorción, como pueden ser los materiales básicos de las paredes, techos y suelos, las superficies vibrantes como ventanas, puertas o tabiques separadores, el público y las sillas, etc., se denominan materiales absorbentes a aquellos usados específicamente como revestimiento del interior de un recinto para aumentar la absorción del sonido con, al menos, uno de los siguientes objetivos:

- Reducir el nivel del campo reverberante en ambientes excesivamente ruidosos.
- Optimizar el tiempo de reverberación según la aplicación a la que se dedique el recinto.
- Eliminar o prevenir la aparición de ecos.

Además, estos materiales, al absorber la energía sonora incidente, mejoran los resultados de los materiales propiamente aislantes. Generalmente, son materiales porosos de estructura fibrosa o granular, constituidos básicamente de lana de vidrio, lana mineral, espuma a base de resina de melamina o espuma de poliuretano.

El mecanismo de absorción es el siguiente:

Cuando la onda sonora incide sobre estos materiales, una parte de la energía es reflejada y el resto penetra en su interior a través de sus poros. Una vez dentro, la

presión sonora pone en movimiento las partículas de aire que se encuentran en los espacios huecos del material. Este flujo de aire interno es el responsable de la disipación de la energía sonora en forma de calor, debido al rozamiento con las capas sólidas del material.

Cuanto más veces se haga pasar la onda sonora a través de estos materiales, mayor será la atenuación que experimente. Por eso, se suelen colocar sobre las paredes límites del recinto que se pretende acondicionar. Así, la porción de energía que atraviesa completamente el material, es reflejada hacia el mismo por la pared interior, donde nuevamente es absorbida.

La capacidad de absorción de estos materiales porosos se mide a través del denominado coeficiente de absorción,  $\alpha$ , que mide la relación entre la energía absorbida y la incidente. Suelen ser proporcionados por el fabricante de dichos materiales para las diferentes bandas de octava.

Vemos, pues, que  $\alpha$  depende de la frecuencia. Generalmente, en estos materiales suele aumentar con la misma, ya que hay más ciclos por segundo y, por tanto, más rozamiento. De modo que, según sean nuestras necesidades de absorción, deberemos seleccionar uno u otro material.

Por otra parte, las características de absorción no sólo dependen de cuál sea el valor de  $\alpha$ , sino que hay otros factores muy influyentes, como el espesor del material, la distancia del material a la pared, el grado de porosidad del material, la densidad del material o la colocación.

### 2.5.2 Resonadores

Los resonadores son absorbentes selectivos, cuyo coeficiente de absorción presenta un máximo en la denominada frecuencia de resonancia. Dicha frecuencia estará determinada por la estructura y las propiedades de los materiales que componen el resonador.

Su uso permite recortar la respuesta de la sala en determinadas frecuencias para reducir su tiempo de reverberación. Es habitual utilizarlos como complemento de los materiales absorbentes con el fin de lograr un mayor aumento de la absorción en bajas frecuencias (500 Hz).

Los tres tipos de resonadores más comunes son los resonadores de membrana, los resonadores simples de cavidad (Helmholtz) y los resonadores múltiples de cavidad (Helmholtz).

- **Resonadores de membrana**

Estos mecanismos están formados por un panel no poroso y flexible colocado a una cierta distancia del tabique o forjado como se muestra en la siguiente figura:

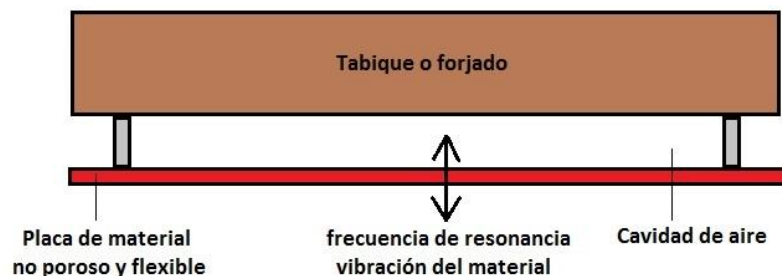


Figura 2.15 Resonador de membrana

Al incidir la onda acústica sobre el panel, este entra en vibración, siendo dicha vibración de amplitud máxima para la frecuencia igual a la frecuencia de resonancia. Esta vibración provoca una pérdida de parte de la energía incidente. De este modo, cuando la placa recibe el impacto de la onda acústica, se absorberán aquellas frecuencias iguales a la frecuencia de resonancia del material. Por lo tanto, la absorción será mayor para frecuencias igual a la frecuencia de resonancia, y fuera de este rango no habrá casi absorción.

- **Resonador simple de cavidad (Helmholtz)**

Un resonador simple de cavidad o un resonador de Helmholtz es un volumen de aire contenido en una cavidad con al menos una abertura. El resonador simple está formado por una cavidad esférica de aire conectada a la sala a través de un cuello como se muestra en la siguiente figura:

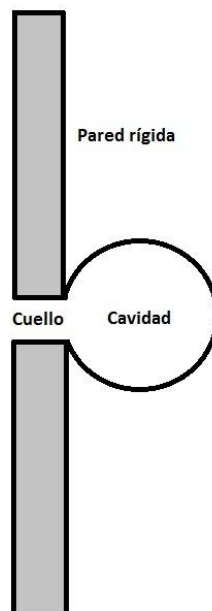


Figura 2.16 Resonador simple de cavidad o resonador de Helmholtz

El aire que hay en el cuello se comporta como una masa y el aire que hay en la cavidad se comporta como un muelle, de manera que constituye el elemento de rigidez. Estos dos elementos (muelle-masa) dan lugar a un sistema resonante, que presentará un pico de absorción en dicha frecuencia de resonancia.

- **Resonador múltiple de cavidad (Helmholtz)**

Está formado por un panel rígido y no poroso, con perforaciones circulares o ranuras, colocado a una cierta distancia del tabique o forjado como se muestra en la siguiente figura:

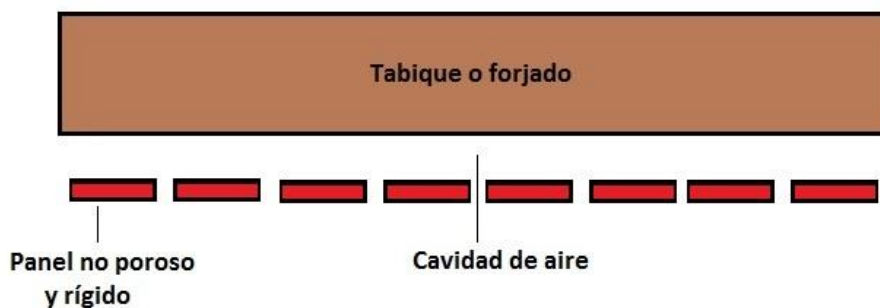


Figura 2.17 Resonador múltiple de cavidad

El resonador múltiple de Helmholtz se comporta de manera que el aire contenido en las perforaciones del panel vibra con la llegada de un frente acústico, generándose un rozamiento de las partículas del aire con las paredes y, por lo tanto, originando capacidad absorbente. Visto de otra forma, el sistema se puede comportar como un conjunto de resonadores simples que comparten una misma cavidad. En la siguiente imagen se puede observar un resonador múltiple real.



Figura 2.18 Resonador de cavidad múltiple

### 2.5.3 Reflectores

Aunque todos los elementos son susceptibles de sufrir reflexión en menor o mayor grado dependiendo de su coeficiente de absorción, se denominan reflectores a aquellos elementos específicamente diseñados para generar reflexiones orientadas hacia las zonas del público que necesitan ser reforzadas.

Se caracterizan por ser lisos, rígidos y no porosos, de modo que su coeficiente de absorción es mínimo (idealmente  $\alpha=0$ ). Estas características hacen que la mayor parte de la energía sonora que incide sobre ellos se refleje concentrada en la dirección especular.

Su objetivo fundamental es aumentar la presencia de reflexiones útiles destinadas al público. Entendemos por reflexiones útiles aquellas primeras reflexiones que llegan después del sonido directo y que son integradas con el mismo por el oído.

En el caso de salas destinadas a la palabra, sólo se consideran los primeros 50 ms y una riqueza de primeras reflexiones implicará una inteligibilidad y sonoridad altas.

Se pueden distinguir dos tipos de reflectores: planos y curvos.

#### **2.5.4 Difusores**

Se denominan difusores a aquellos elementos que reflejan el sonido uniformemente en todas las direcciones. Su aplicación está fundamentalmente destinada a salas de conciertos. Con ellos se consigue elevar el grado de espacialidad del sonido, con lo que la impresión de la calidad acústica del recinto mejora considerablemente. Un uso alternativo, válido para cualquier tipo de sala, es mejorar la difusión del sonido para eliminar anomalías acústicas como: ecos, coloraciones, focalizaciones, etc.

Existen distintos elementos que funcionan como difusores del sonido:

- Superficies con adornos, relieves, irregularidades, huecos, rugosidades, etc. Por ejemplo, techos artesonados (con paneles poligonales), estatuas, etc. Un caso particular es la zona ocupada por las sillas, con o sin espectadores, que presenta un alto grado de difusión, pero debido a su alta absorción no funciona como difusor.
- Difusores policilíndricos: conjunto de superficies lisas y convexas cuyo radio de curvatura es menor que 5 m. La zona de cobertura es mucho mayor que la de los reflectores convexos y el nivel de las reflexiones menor, por ese motivo funcionan como difusores.
- Difusores de Schroeder: superficies con irregularidades creadas según la teoría de los números de Schroeder. También se denominan RPG ("Reflection Phase Grating").

Todos ellos se comportan como difusores para un determinado rango de frecuencias, fijado por las dimensiones de las irregularidades. Para frecuencias bajas

(longitud de onda alta), las reflexiones tienden a concentrarse en la dirección especular, porque para estas frecuencias las irregularidades son imperceptibles. Así que, según la frecuencia límite a partir de la cual queremos aumentar la difusión sonora, así deberán ser las dimensiones de las irregularidades. Cuanto más grandes sean, más baja será la frecuencia límite.

En la siguiente figura podemos observar un difusor real



Figura 2.19 Difusor



## **Capítulo III. Diseño acústico de aulas.**

## **Capítulo III. Diseño acústico de aulas.**

### **3.1 Preámbulo**

El principal objetivo en el diseño acústico de aulas es lograr una buena inteligibilidad de la palabra, es decir, que en cualquier punto del aula donde pueda situarse el oyente, sea capaz no solo de oír el mensaje sino de entenderlo.

Son numerosos los factores que influyen en la inteligibilidad de la palabra, como por ejemplo, el ruido de fondo, el nivel de reverberación de la sala o las anomalías acústicas (ecos, focalizaciones del sonido, coloraciones...), las cuales perjudican severamente la comprensión del mensaje y resultan muy molestas al oyente.

Estos tres factores pueden ser corregidos en la medida de lo posible durante la fase de diseño. Sin embargo, existen otros factores, los cuales son inherentes a la voz humana, y por tanto, más difíciles de corregir, como por ejemplo, la directividad de la voz.

El objetivo de este capítulo es definir una serie de parámetros que nos permitan caracterizar de forma fidedigna las cualidades acústicas del aula objeto de estudio.

### **3.2 Parámetros acústicos**

#### **3.2.1 Nivel de presión sonora (SPL)**

El campo sonoro, tanto en espacios abiertos como cerrados, se caracteriza normalmente mediante el nivel de presión sonora, el cual se define como 20 veces el logaritmo de la relación entre el valor eficaz de la presión sonora y el valor eficaz de la presión umbral de audición, a 1 kHz:

$$\text{SPL} = 20 \log \frac{p_{\text{ef}}}{p_{\text{ref}}} \text{ (en dB)}$$

donde:

$p_{\text{ef}}$  = presión eficaz del sonido en consideración

$p_{\text{ref}}$  = presión eficaz correspondiente al umbral de audición, a 1 kHz ( $2 \cdot 10^{-5}$  Pa)

La utilización de dicha referencia tiene como objetivo que todos los sonidos audibles sean representados por valores SPL positivos.

La elección de representar el sonido en dB se debe a que el oído responde a los estímulos sonoros de forma logarítmica, de manera que si se expresasen los sonidos audibles en Pascales (Pa), la escala sería excesivamente amplia: desde el umbral de audición,  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa, hasta el umbral del dolor, 100 Pa. Así, los valores manejados quedan comprendidos entre 0 dB (por escoger el umbral de audición como valor de referencia) y 135 dB, siendo 1 dB el mínimo cambio perceptible.

### 3.2.2 Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación, a una determinada frecuencia, se define como el tiempo que transcurre desde que la fuente sonora deja de emitir hasta que el nivel de presión sonora cae 60 dB. Cuando el valor del tiempo de reverberación es grande se dice que el recinto es “vivo”, en cambio, si el valor es pequeño, se tratará de un recinto “apagado”. En la siguiente figura se representa un diagrama explicativo del tiempo de reverberación:

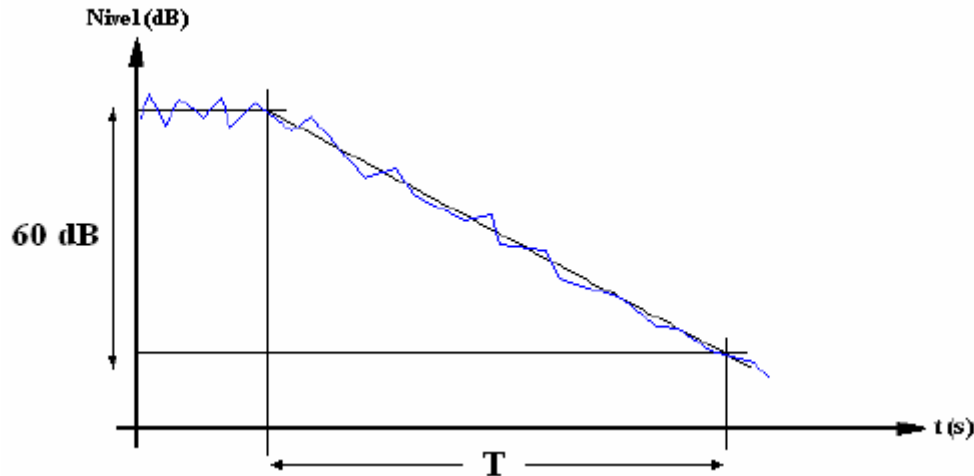


Figura 3.1 Ejemplo de diagrama de tiempo de reverberación

Por tanto, podemos decir que tenemos un tiempo de reverberación para cada banda de frecuencias (octavas o tercios de octava) y que este decae irregularmente dependiendo de la absorción en las diferentes frecuencias de los materiales existentes en el recinto.

Hasta el día de hoy, el tiempo de reverberación ha sido el parámetro más representativo de la acústica de un recinto, de forma que, a pesar de que las medidas se efectúen para cada una de las frecuencias características, cuando nos encontramos un valor único de tiempo de reverberación para una sala, se referirá a aquel que se obtiene de la media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1000 Hz, representándose como  $TR_{mid}$ , medido en segundos:

$$TR_{mid} = \frac{TR(500 \text{ Hz}) + TR(1000 \text{ Hz})}{2}$$

En general, el valor más adecuado de  $TR_{mid}$  depende tanto del volumen del recinto como de la actividad a la que se haya previsto destinarlo. Por ejemplo, cuando se trata de salas destinadas a la palabra, es conveniente que los valores de TR sean bajos, con objeto de conseguir una buena inteligibilidad, mientras que en el caso de salas de

conciertos son recomendables unos valores apreciablemente más elevados a fin de que la audición musical resulte óptima. En la siguiente tabla se dan los márgenes de valores recomendados de  $TR_{mid}$  para diferentes tipos de salas.

RECINTO O ACTIVIDAD	VALOR LÍMITE DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN
Aulas vacías, $V < 350 \text{ m}^3$ (sin ocupación ni mobiliario)	$T \leq 0,7s$
Salas de conferencias vacías, $V < 350 \text{ m}^3$ (sin ocupación ni mobiliario)	$T \leq 0,7s$
Auditorios cerrados vacíos, $V < 350 \text{ m}^3$ (sin ocupación ni mobiliario)	$T \leq 0,7s$
Aulas sin ocupación pero con mobiliario, $V < 350 \text{ m}^3$	$T \leq 0,5s$
Salas de conferencias sin ocupación pero con mobiliario, $V < 350 \text{ m}^3$	$T \leq 0,5s$
Auditorios cerrados sin ocupación pero con mobiliario, $V < 350 \text{ m}^3$	$T \leq 0,5s$

Figura 3.2 Márgenes de valores recomendados de  $TR_{mid}$  en función del tipo de sala [9]

Debido a las particularidades del sonido y los recintos, el tiempo de reverberación no es exactamente el mismo en todos los puntos de la sala, aunque salvo casos muy particulares, se asemeja bastante.

El tiempo de reverberación está íntimamente relacionado con la inteligibilidad de la palabra. En una sala viva o reverberante ( $TR$  elevado), la persistencia de las vocales en el tiempo es todavía mayor que la que habría en espacio libre, que ya de por sí es elevada (90 ms). Esta mayor duración de las vocales, junto con su mayor nivel sonoro y el hecho de que su espectro sea rico en bajas frecuencias, pueden llevar a un solapamiento de las vocales sobre las consonantes. Dado que estas últimas son las que aportan significado al mensaje, si son enmascaradas parcial o totalmente, la inteligibilidad de la palabra disminuirá. Así pues, cuanto mayores sean las exigencias de

una sala respecto a la inteligibilidad de la palabra, menor será el tiempo de reverberación óptimo. Además, conviene que sea lo más constante posible con la frecuencia, en especial, en bajas frecuencias (bandas de octava 125 y 250 Hz).

Por otra parte, para un correcto diseño acústico, es aconsejable que la variación del tiempo de reverberación con el grado de ocupación de la sala sea pequeña, para que las condiciones acústicas sean aceptables en cualquier circunstancia.

A la hora de obtener el tiempo de reverberación, también se puede hacer de manera teórica mediante las fórmulas basadas en la teoría estadística (Sabine, Eyring, Arau-Puchades, Kuttruff, etc.). El inconveniente es que su valor es independiente de la posición del receptor y además, sólo es válido en condiciones de campo difuso (la propagación del sonido en el recinto es equiprobable en cualquier dirección).

Las más usuales son la formula de Sabine y la formula de Eyring.

- **Fórmula de Sabine:**

La fórmula clásica por excelencia, y aceptada como referencia a nivel internacional por su sencillez de cálculo, es la denominada fórmula de Sabine. La correspondiente expresión matemática, obtenida aplicando la teoría acústica estadística y despreciando el efecto de la absorción producida por el aire, es la siguiente:

$$TR = 0,161 \frac{V}{A_{\text{tot}}} \text{ (en segundos)}$$

donde:

$V$  = volumen del recinto (en  $\text{m}^3$ )

$A_{\text{tot}}$  = absorción total del recinto

En cuanto a la denominada absorción  $A$  de un material cualquiera, esta se obtiene como resultado de multiplicar su coeficiente de absorción  $\alpha$  por su superficie  $S$ . La unidad de absorción es el Sabin (1 Sabin corresponde a la absorción de  $1\text{m}^2$  de ventana abierta).

Debido a que un recinto está constituido por distintas superficies recubiertas de materiales diversos, se define la absorción total  $A_{\text{tot}}$  como la suma de todas y cada una de las absorciones individuales, es decir:

$$A_{\text{tot}} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_n S_n$$

- **Fórmula de C.F. Eyring:**

Es la más generalizada para cálculos precisos, donde los coeficientes promedio de absorción son mayores de 0.15, y existe una distribución uniforme de los materiales absorbentes para frecuencias comprendidas entre 125 y 4000 Hz.

$$TR = \frac{0,161 V}{S [-2,3 \log_{10} (1 - \bar{\alpha})]} \text{ (en segundos)}$$

donde:

$V$  = volumen del recinto (en  $\text{m}^3$ )

$S$  = superficie (en  $\text{m}^2$ )

$\bar{\alpha}$  = coeficiente promedio de absorción

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_n S_n}{S_1 + S_2 + S_n}$$

Existen dos parámetros definidos a partir del tiempo de reverberación, que se utilizan exclusivamente en recintos destinados a la música; estos son la calidez acústica y el brillo.

### 3.2.3 Calidez acústica

Se dice que una sala tiene calidez acústica (o timbre, según Wilkens) si presenta una buena respuesta a frecuencias bajas. La palabra calidez representa, pues, la riqueza de graves, la suavidad y la melosidad de la música en la sala.

Como medida objetiva de la calidez se suele utilizar el parámetro BR (“Bass Ratio”). Se define como la relación entre la suma de los tiempos de reverberación a frecuencias bajas (125 Hz y 250 Hz) y la suma de los tiempos de reverberación correspondientes a frecuencias medias (500 Hz y 1 kHz).

Según Beranek, el margen de valores recomendados de BR para una sala de conciertos destinada a música sinfónica y totalmente ocupada es:

$$1,10 \leq BR \leq 1,25 \text{ (si } TR_{\text{mid}} = 2,2 \text{ s)}$$

$$1,10 \leq BR \leq 1,45 \text{ (si } TR_{\text{mid}} = 1,8 \text{ s)}$$

Para salas con valores de  $TR_{\text{mid}}$  comprendidos entre 1,8 s y 2,2 s, el valor máximo recomendado de BR se halla por interpolación.

### 3.2.4 Brillo

El brillo Br de una sala es la relación entre la suma de los tiempos de reverberación a frecuencias altas (2 kHz y 4 kHz) y la suma de los tiempos de reverberación correspondientes a frecuencias medias (500 Hz y 1 kHz).



Mide la riqueza en altas frecuencias (sonidos agudos) de la sala, lo que conduce a un sonido claro y brillante.

Beranek recomienda que el valor de Br para salas totalmente ocupadas verifique:

$$Br \geq 0,87$$

No obstante, conviene tener presente que el brillo no será, por lo general, mayor que 1. Ello se debe a la pérdida de energía de las ondas sonoras al propagarse a través del aire causada por la fricción existente entre sus partículas. Dicha inevitable absorción tiene lugar a partir de la frecuencia de 2 kHz, aumenta con la frecuencia y también aumenta a medida que la humedad relativa disminuye.

Excepcionalmente, el sonido de una sala puede llegar a ser excesivamente brillante en el caso de que se utilice de forma incorrecta un sistema electrónico de amplificación del sonido.

### **3.2.5 Tiempo de caída inicial (EDT)**

El tiempo de caída inicial (EDT, Early Decay Time) se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que el foco emisor deja de emitir hasta que el nivel de presión sonora decae 10 dB. Es decir, sería el tiempo de reverberación de la sala si siguiese el patrón de caída inicial (Figura 3.3).

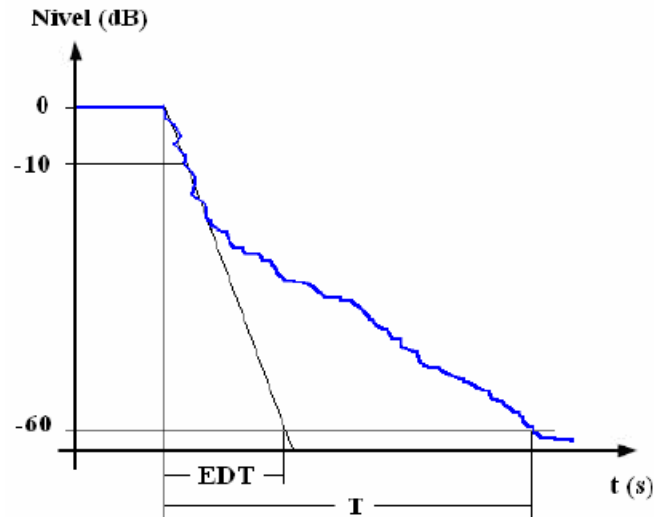


Figura 3.3 Relación entre EDT y TR

Para que exista una perfecta difusión del sonido, TR y EDT deberán ser iguales. Sin embargo, normalmente estos dos valores son distintos, ya que es difícil conseguir en la práctica un campo sonoro difuso y la curva de caída presentará una doble pendiente más o menos acusada, como podemos ver en la figura anterior.

El EDT está más relacionado con la sensación subjetiva de viveza que el TR, utilizado tradicionalmente. Esto significa que, en todos aquellos puntos de una sala con un EDT significativamente menor que el TR, la sala resultará, desde un punto de vista subjetivo, más apagada de lo que se deduciría del valor de TR.

Para conseguir una buena difusión del sonido, es preciso que el valor medio de los EDT correspondientes a las bandas de 500 Hz y un 1 kHz sea del mismo orden que  $TR_{mid}$ .

### 3.2.6 Claridad de la voz ( $C_{50}$ )

La claridad de la voz  $C_{50}$  se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye

el sonido directo y las primeras reflexiones) y la que le llega después de los primeros 50 ms. Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz y se expresa en escala logarítmica:

$$C_{50} = \frac{\text{Energía hasta 50 ms}}{\text{Energía a partir de 50 ms}} \text{ (en dB)}$$

Según L.G. Marshall, el valor representativo de  $C_{50}$  se calcula como la media aritmética ponderada de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz, y recibe el nombre de “speech average”. Los factores de ponderación son: 15%, 25%, 35% y 25%, respectivamente, de acuerdo con la contribución estadística aproximada de cada banda a la inteligibilidad de la palabra:

$$\begin{aligned} C_{50}(\text{"speech average"}) \\ = 0,15 \cdot C_{50}(500 \text{ Hz}) + 0,25 \cdot C_{50}(1 \text{ kHz}) + 0,35 \cdot C_{50}(2 \text{ kHz}) + 0,25 \\ \cdot C_{50}(4 \text{ kHz}) \end{aligned}$$

El valor recomendado de  $C_{50}$  (“speech average”) correspondiente a un aula debe verificar:

$$C_{50}(\text{"speech average"}) > 2,5 \text{ dB}$$

Cuanto más elevado sea dicho valor, mejor será la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en el aula.

### 3.2.7 Definición (D)

Según Thiele, la definición D es la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía total recibida por el mismo. Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz:

$$D = \frac{\text{Energía hasta 50 ms}}{\text{Energía total}}$$

Para evaluar la definición tomamos el valor medio de la misma medido en las frecuencias de 500Hz y 1kHz. Este valor debería ser superior al 65%, ya que un valor bajo de la definición muestra que la energía sonora reflejada en los primeros 50 ms es pequeña en relación con la energía reflejada total y, por tanto, que el recinto es poco íntimo, el tiempo de reverberación excesivo y la sala muy “viva”.

Por otra parte, el conocimiento del valor de la claridad de la voz  $C_{50}$  en una banda cualquiera permite calcular de forma inmediata el valor de la definición  $D$  en dicha banda, y viceversa. La fórmula pertinente, obtenida directamente de las definiciones de ambos parámetros, es la que sigue:

$$D = \frac{1}{1 + 10^{\frac{-C_{50}}{10}}}$$

### 3.2.8 Pérdida de articulación de consonantes (%ALCons)

A principios de los años 70, el investigador V.M.A. Peutz realizó un estudio gracias al cual estableció una fórmula para el cálculo de la inteligibilidad. El estudio consistió en realizar una serie de pruebas de audiencia en diferentes recintos basadas en la emisión de un conjunto preestablecido de “logatomos” (palabras sin significado formadas por: consonante-vocal-consonante). Cada individuo receptor tomaba nota de lo que escuchaba y, posteriormente, se procesaba toda la información recogida y se establecía una estadística de los resultados obtenidos. Si, por ejemplo, el porcentaje medio de logatomos detectados correctamente en uno de los recintos era de un 85%, entonces se consideraba que la pérdida de información era de un 15%. Como dicha

pérdida se asociaba a una percepción incorrecta de las consonantes, Peutz la denominó:  
% de Pérdida de Articulación de Consonantes.

Este parámetro relaciona el tanto por ciento de consonantes no entendidas correctamente por un oyente en un recinto con reverberación y ruido, con el total de consonantes emitidas. De este modo, cuanto mayor sea el valor del %ALCons, menor será la inteligibilidad de la palabra.

Apoyándose en la teoría estadística consiguió obtener una relación con el tiempo de reverberación:

$$\%ALCons = \frac{200 r^2 TR^2}{V Q} \text{ (para } r < 3,16 D_c \text{)}$$

$$\%ALCons = 9 TR \text{ (para } r > 3,16 D_c \text{)}$$

donde:

$r$  = distancia entre el emisor (orador) y el receptor (en m)

$TR$  = tiempo de reverberación de la sala (en s)

$V$  = volumen de la sala (en  $m^3$ )

$D_c$  = distancia crítica =  $0,14\sqrt{Q R}$

$Q$  = factor de directividad de la fuente sonora en la dirección considerada ( $Q = 2$  en el caso de la voz humana, considerando la dirección frontal del orador)

$$R = \frac{S_{tot} \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

$S_{tot}$  = superficie total de la sala (en  $m^2$ )

$\bar{\alpha}$  = coeficiente medio de absorción de la sala

Habitualmente, %ALCons se calcula en la banda de 2 kHz, por tratarse de la banda de máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra.

### 3.2.9 Índice de transmisión del habla (STI)

El índice STI, definido por Houtgast y Steeneken, permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra entre los valores 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima). El STI se calcula a partir de la reducción de los diferentes índices de modulación “m” de la voz debida a la existencia de reverberación y de ruido de fondo en una sala.

Las 14 frecuencias de modulación  $F_m$  consideradas son las siguientes:

$F_m$ (Hz)	0,63	0,8	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
------------	------	-----	---	------	-----	---	-----	------	---	---	-----	---	----	------

Cada una de estas frecuencias produce un efecto de modulación sobre las 7 bandas de octava más representativas de la voz, cuyas frecuencias centrales son las detalladas a continuación:

$F_0$ (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
------------	-----	-----	-----	------	------	------	------

El proceso de cálculo del STI, según Houtgast y Steeneken, se desarrolla en varias etapas:

#### 1. Cálculo de la reducción de los índices de modulación:

La expresión genérica correspondiente a la reducción del índice de modulación “m” para cada combinación de frecuencias  $F_0$  y  $F_m$  se denomina función de

transferencia de modulación MTF (“Modulation Transfer Function”). Su expresión es la siguiente:

$$m(F_0, F_m) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi F_m f(F_0)}{13,8}\right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{-S}{N} \frac{F_0}{10}}}$$

donde:

$f(F_0)$  = función genérica asociada al grado de reverberación del recinto considerado. Se le puede asignar valores de tiempo de reverberación (TR) o de “Early Decay Time” (EDT)

$\frac{S}{N}(F_0)$  = relación señal/ruido correspondiente a la banda centrada en la frecuencia  $F_0$

Debido a que existen 14 valores de  $F_m$  y 7 valores de  $F_0$ , el número total de valores de  $m(F_0, F_m)$  es de:  $14 \times 7 = 98$ .

2. Conversión de los índices  $m(F_0, F_m)$  a relaciones señal/ruido aparentes  $(S/N)_{ap}$ :

$$(S/N)_{ap}(F_0, F_m) = 10 \log \frac{m(F_0, F_m)}{1 - m(F_0, F_m)}$$

Los 98 valores obtenidos se truncan de manera que todos ellos estén comprendidos entre 15 dB y -15 dB.

3. Cálculo de las relaciones señal/ruido aparentes medias por bandas de octava

$$\overline{(S/N)_{ap}}(F_0):$$

Para cada banda de octava, se calcula el valor medio de las 14 relaciones señal/ruido aparentes, según la siguiente expresión:

$$\overline{(S/N)}_{ap}(F_0) = \frac{\sum_{F_m} (S/N)_{ap}(F_0, F_m)}{14}$$

4. Cálculo de la relación señal/ruido aparente media global  $\overline{(S/N)}_{ap}$ :

Para dicho cálculo se tienen en cuenta los siguientes factores de ponderación para cada banda de octava, en función de su grado de contribución a la inteligibilidad:

$$\begin{aligned} \overline{(S/N)}_{ap} = & 0,010\overline{(S/N)}_{ap}(125 \text{ Hz}) + 0,042\overline{(S/N)}_{ap}(250 \text{ Hz}) \\ & + 0,129\overline{(S/N)}_{ap}(500 \text{ Hz}) + 0,200\overline{(S/N)}_{ap}(1 \text{ kHz}) \\ & + 0,312\overline{(S/N)}_{ap}(2 \text{ kHz}) + 0,250\overline{(S/N)}_{ap}(4 \text{ kHz}) \\ & + 0,057\overline{(S/N)}_{ap}(8 \text{ kHz}) \end{aligned}$$

5. Cálculo del índice STI

El valor del índice STI se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$STI = \frac{\overline{(S/N)}_{ap} + 15}{30}$$

Se puede comprobar fácilmente que los valores de STI siempre están comprendidos entre 0 y 1 debido a que los valores de  $\overline{(S/N)}_{ap}$  se hallan entre -15 dB y +15 dB.

### 3.2.10 RASTI (“Rapid Speech Transmission Index”)

El índice RASTI es una versión simplificada del STI. Por lo tanto, existe una analogía en cuanto al cálculo de ambos parámetros.

La simplificación consiste en reducir el número de frecuencias de modulación, así como las bandas de octava a tener en cuenta. En concreto, las bandas de octava



consideradas y las frecuencias de modulación asociadas a cada una de ellas son las siguientes:

<b>F<sub>0</sub> (Hz)</b>	<b>F<sub>m</sub> (Hz)</b>			
500	1	2	4	8

<b>F<sub>0</sub> (Hz)</b>	<b>F<sub>m</sub> (Hz)</b>				
2000	0,7	1,4	2,8	5,6	11,2

Por lo tanto, el número de índices de modulación calculados es únicamente de 9, frente a los 98 utilizados en el caso del índice STI.

Los pasos a seguir para el cálculo del RASTI coinciden con los correspondientes al STI, con la excepción de que se calcula una única relación señal/ruido aparente media, que se toma como global:

$$\overline{(S/N)}_{ap} = \frac{\sum_{F_0 F_m} (S/N)_{ap}(F_0, F_m)}{9}$$

Existe una muy buena correlación entre los valores de %ALCons y de STI/RASTI. Dicha correspondencia se muestra en las siguientes figura y tabla. En esta última aparece también la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad.

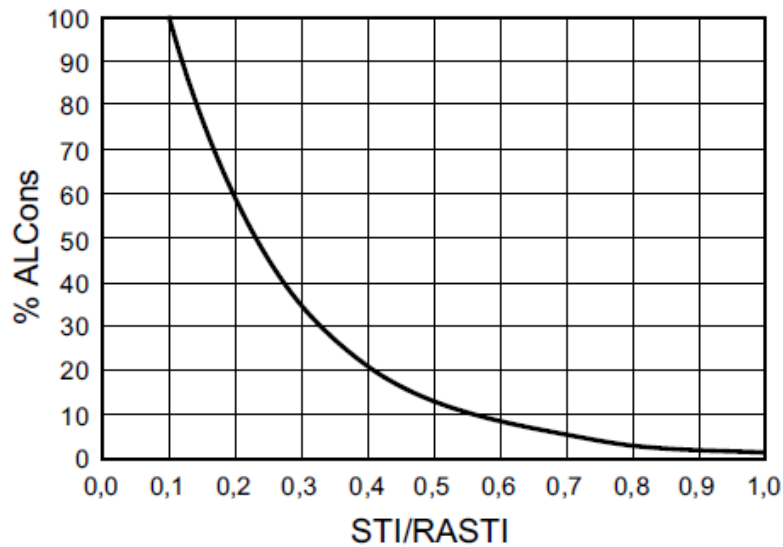


Figura 3.4 Correspondencia entre STI/RASTI y %ALCons

%ALCons	STI/RASTI	Valoración subjetiva
1,4% - 0%	0,88 – 1	Excelente
4,8% - 1,6%	0,66 - 0,86	Buena
11,4% - 5,3%	0,50 - 0,64	Aceptable
24,2% - 12%	0,36 - 0,49	Pobre
46,5% - 27%	0,24 - 0,34	Mala

Figura 3.5 Relación entre %ALCons, STI/RASTI y la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad

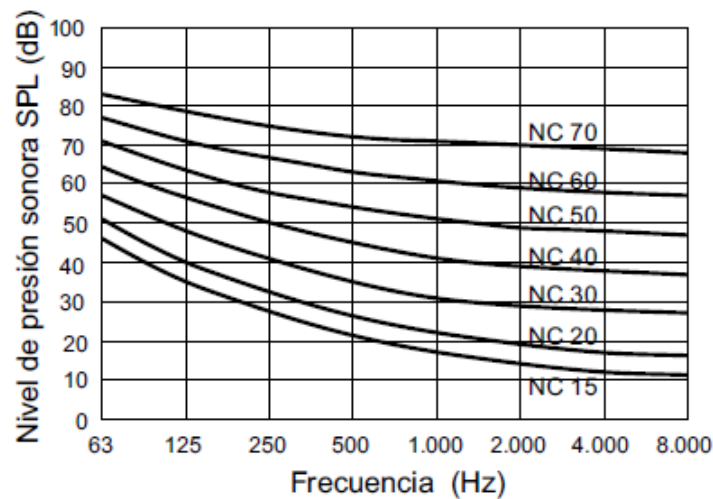
[17]

### 3.2.11 Criterio de ruido de fondo

El ruido de fondo es todo aquel ruido presente en una sala cuando no se realiza ninguna actividad. Dicho ruido puede provenir del exterior del recinto o tener su origen en los sistemas de climatización y en las instalaciones eléctricas.

El efecto principal del ruido de fondo sobre la palabra será el enmascaramiento, con la consecuente reducción de inteligibilidad. Para estudiar en qué cantidad afecta el ruido a la palabra, debemos tener en cuenta las características espectrales y temporales del ruido.

El método para evaluar objetivamente el grado de molestia que produce un determinado ruido de fondo se basa en comparar los niveles de ruido existentes en la sala para cada banda de octava comprendida entre 63Hz y 8kHz, con un conjunto de curvas de referencia denominadas NC (Noise Criteria). Se trata de un índice proporcionado por L.L. Beranek, con el que se relaciona el espectro de un ruido con la alteración que produce en la comunicación verbal, teniendo en cuenta los niveles de interferencia de la palabra y los niveles de sonoridad. Así, las curvas NC siguen de forma aproximada la evolución de la sensibilidad del oído en función de la frecuencia.



Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	dBA
NC15	47	36	29	22	17	14	12	11	27,08
NC20	51	40	33	26	22	19	17	16	31,32
NC25	54	44	37	31	27	24	22	21	35,57
NC30	57	48	41	35	31	29	28	27	39,73
NC35	60	52	45	40	36	34	33	32	44,19
NC40	64	57	50	45	41	39	38	37	49,10
NC45	67	60	54	49	46	44	43	42	53,38
NC50	71	64	58	54	51	49	48	47	58,08
NC55	74	67	62	58	56	54	53	52	62,54
NC60	77	71	67	63	61	59	58	57	67,42
NC65	80	75	71	68	66	64	63	62	72,23
NC70	83	79	75	72	71	70	69	68	77,38

Figura 3.6 Gráfica y valores de las curvas NC (Noise Criteria)

Estas curvas, que podemos ver en la Figura 3.6, se utilizan para determinar el nivel de ruido máximo recomendado dependiendo de la funcionalidad de la sala. Un recinto cumplirá una determinada curva NC si sus niveles de ruido de fondo se encuentran por debajo de la curva NC correspondiente en todas las bandas de octava. El cumplimiento de la especificación NC es el primer paso para conseguir un confort acústico y un grado de inteligibilidad adecuados. Como vemos en la siguiente figura, en el caso de aulas se recomienda que el ruido de fondo se encuentre entre las curvas NC 20 y NC 30.

<b>ESPACIO TIPO</b>	<b>CURVA NC RECOMENDADA</b>
Sala de conferencias/aula	20 – 30
Biblioteca	30 – 35
Restaurante	35 – 40
Cafetería	40 – 45
Polideportivo	40 – 50

Figura 3.7 Valores de curvas NC recomendadas para diferentes tipos de recintos [17]

## **Capítulo IV. Caracterización acústica del aula.**

## Capítulo IV. Caracterización acústica del aula.

### 4.1 Preámbulo

Son los parámetros definidos en el capítulo anterior como el ruido de fondo, el tiempo de reverberación, el tiempo de caída inicial (EDT), la claridad de la voz ( $C_{50}$ ), el índice de transmisión del habla (STI), etc., los que nos van a permitir caracterizar acústicamente el aula objeto de estudio.

Durante este capítulo se analizará el aula 008 desde el punto de vista arquitectónico, dando sus dimensiones y describiendo los diferentes materiales que conforman el acondicionamiento acústico del aula. También se detallará el montaje y el procedimiento de medida que se ha seguido a la hora de hacer las mediciones.

### 4.2 Descripción del aula

El recinto objeto de estudio es el aula 008, aula en la que se imparten las clases del Máster en Ingeniería Ambiental. Esta aula se encuentra en la planta baja de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. El edificio está ubicado en la Isla de la Cartuja, en el que fuera el pabellón de América durante la Exposición Universal de 1992.

Es un aula con capacidad para 60 personas, aproximadamente, dispuestas en 5 filas, cuyas dimensiones son las siguientes:

- Altura: 2,65 m
- Anchura: 9,50 m
- Longitud: 10,20 m
- Área: 96,90 m<sup>2</sup>

- Volumen: 256,785 m<sup>3</sup>
- Número de asientos: 60 aprox.

A continuación se muestran fotografías del aula 008:



Figura 4.1 Vista del aula 008 desde la pared del fondo



Figura 4.2 Vista del aula 008 desde la pared de las pizarras





Figura 4.3 Vista del aula 008 desde la esquina superior derecha



Figura 4.4 Vista del aula 008 desde la esquina superior izquierda

En las imágenes anteriores observamos los diferentes materiales que componen el aula: mármol en el suelo, placas de yeso en el techo y paredes de ladrillo, excepto la pared lateral derecha y la pared del fondo que son de madera.

### 4.3 Equipo de medida

Los instrumentos de medida necesarios para realizar las medidas “in situ”, que se llevarán a cabo en cada uno de los diferentes puntos de la sala, son los que se muestran a continuación:

#### 4.3.1 Symphonie

Todas las medidas se realizarán mediante el sistema Symphonie. Dicho sistema consiste en una unidad de adquisición de dos canales que transfiere todos los datos en tiempo real a un ordenador, a través de una conexión PCMCIA.

Este sistema permite realizar tanto medidas de ruido como de vibraciones a través de distintas interfaces de usuario, dependiendo del tipo de medición que se vaya a realizar. En este caso, usaremos el software de acústica dBati32. Este es un paquete de software empleado en la realización de medidas acústicas en el interior de edificios. Fue desarrollado por el equipo 01dBStell, perteneciente a "MVI technologies group".



Figura 4.5 Symphonie

#### 4.3.2 Micrófono

El micrófono que se va a usar es el modelo 40AF 1/2" Ext. Polarized Free-field Microphone. Pertenece a la empresa G.R.A.S. y tiene una sensibilidad de 50 mV/Pa, gracias al cual se consigue una elevada precisión en las medidas de presión.

#### 4.3.3 Preamplificador

El preamplificador es un elemento que adapta la impedancia de salida del micrófono de medida, la cual es elevada a la impedancia de entrada del equipo de medida, en este caso, el Symphonie, que, al igual que el micrófono, es de la marca G.R.A.S.



Figura 4.6 Preamplificador

#### 4.3.4 Fuente dodecaédrica

Según la normativa vigente, la fuente sonora que se va a usar en este tipo de mediciones ha de ser omnidireccional y con una respuesta en frecuencia razonablemente plana. Por este motivo, la fuente será una dodecaédrica, como la que podemos ver en la figura 4.7, la cual posee un diagrama polar similar al que vemos en la figura 4.8.



Figura 4.7 Fuente dodecaédrica

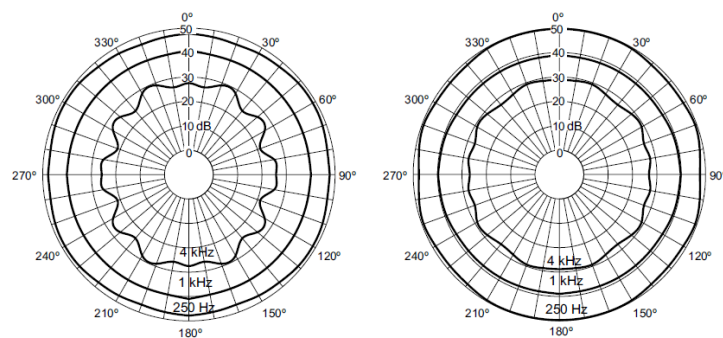


Figura 4.8 Diagramas polares de directividad del dodecaedro utilizado correspondientes a las bandas de 250 Hz, 1 kHz y 4 kHz (plano horizontal y plano vertical) [17]

### 4.3.5 Amplificador de potencia

Para alimentar la fuente dodecaédrica con la señal de emisión, necesitaremos amplificar la señal previamente mediante un amplificador de potencia.



Figura 4.9 Amplificador de potencia similar al utilizado en las mediciones

## 4.4 Montaje

La configuración básica para realizar las distintas mediciones es la siguiente:

Colocamos la fuente sonora en una posición dada en la sala que deseamos medir. La conectamos al amplificador y este, a su vez, a la unidad de adquisición. Seguidamente, unimos el micrófono a la unidad de adquisición mediante un cable extensible y esta al portátil. Previamente, debemos haber instalado en el portátil el software dBBAI32. Variando la posición del micrófono, vamos tomando varias medidas, que necesitaremos luego para poder promediar y obtener un resultado representativo de la acústica del aula.



Figura 4.10 Montaje del equipo de medida

## 4.5 Procedimiento de medida

El procedimiento de medida varía según los parámetros que queramos medir. A continuación, se detallarán los diferentes procedimientos seguidos para cada una de las medidas realizadas:

#### 4.5.1 Medición del ruido de fondo

Como ya se ha comentado, el ruido de fondo es toda aquella señal que se percibe en el aula cuando no hay ninguna fuente emitiendo sonido. En función de su nivel, influirá más o menos en la escucha de lo que queramos percibir. Una de las cuestiones que entra en juego dentro del nivel de ruido de fondo es el aislamiento de la sala contra la penetración de sonidos procedentes de fuentes externas. Estos ruidos se transmiten al interior de la sala, perdiendo parte de su energía, y se suman a los ruidos existentes en la sala debido al uso normal de la misma, como son los sistemas de iluminación, refrigeración o informáticos.

Para realizar esta medida únicamente es necesario colocar el micrófono en diferentes puntos de la sala y tomar muestras del nivel de presión sonora para todas las bandas de frecuencia. En nuestro caso, hemos decidido tomar muestras en 6 puntos diferentes de la misma durante 30 segundos y, con estos datos, realizar el promedio energético de los valores, consiguiendo de este modo, un solo valor promedio para cada una de las bandas de octava.

En la siguiente figura se pueden observar las distintas posiciones de medida:

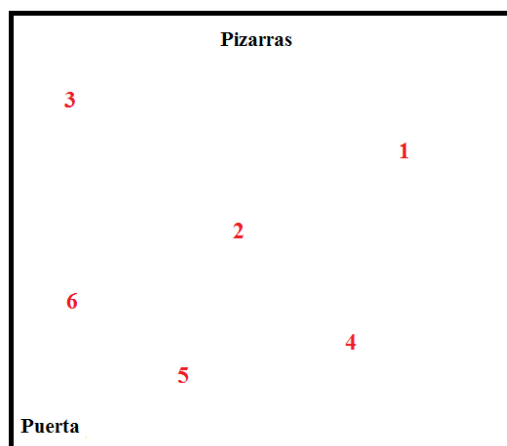


Figura 4.11 Posiciones del micrófono en la medición del ruido de fondo

### 4.5.2 Medición del tiempo de reverberación

Para medir dicho parámetro seguiremos el método de precisión descrito en la norma UNE-EN ISO 3382-2: “Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios”.

La primera recomendación que nos proporciona la norma es que, cuando sea posible, las mediciones se realizarán sin la presencia de personas en el interior, ya que podría influir mucho en la medida del tiempo de reverberación dependiendo del tipo de recinto en estudio. Sin embargo, se suele permitir que un recinto con hasta dos personas represente su estado vacío.

La norma UNE-EN ISO 3382-2 establece tres métodos para la medición del tiempo de reverberación: método de control, método de ingeniería, y método de precisión. En nuestro caso, hemos empleado el método de precisión porque es el que más se ajusta a los propósitos de este proyecto, que es verificar el comportamiento del recinto en estudio con respecto a ciertas recomendaciones de tiempo de reverberación específicas para aulas. Además, debido al carácter difuso de estas aulas, este método proporciona una cantidad mínima de mediciones razonablemente elevada para garantizar unos resultados de tiempo de reverberación realistas.

	Control	Ingeniería <sup>a</sup>	Precisión
Combinaciones fuente-micrófono	2	6	12
Posiciones de la fuente <sup>b</sup>	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Posiciones de micrófono <sup>c</sup>	≥ 2	≥ 2	≥ 3
Número de decrecimientos en cada posición (método del ruido interrumpido)	1	2	3
<sup>a</sup> Cuando el resultado se utiliza para un término de corrección en otras mediciones del nivel de ingeniería, solo se requiere una posición de la fuente y tres posiciones de micrófono. <sup>b</sup> Para el método del ruido interrumpido, se pueden utilizar simultáneamente fuentes no correlativas. <sup>c</sup> Para el método del ruido interrumpido y cuando el resultado se utiliza para un término de corrección, se puede utilizar una percha de micrófono rotativo en lugar de múltiples posiciones de micrófono.			

Figura 4.12 Número mínimo de posiciones y mediciones para los diferentes métodos de medida [24]

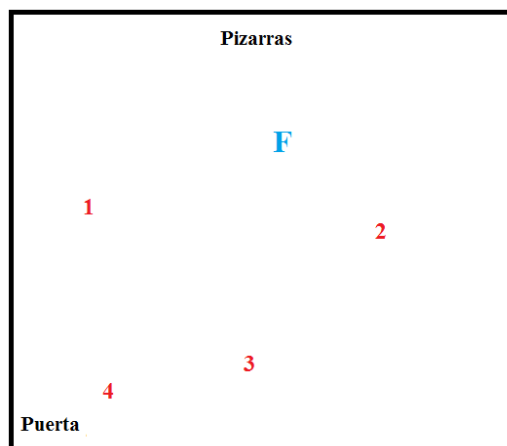


En la figura 4.12 podemos ver los números mínimos de posiciones de medición que necesitaremos para obtener una cobertura adecuada.

En la norma también nos indican que en caso de que el recinto presente una geometría complicada, el número de posiciones deberá ser mayor.

El rango de frecuencias depende del propósito de las mediciones. Cuando no existan requisitos para bandas de frecuencias específicas, el rango de frecuencias debería cubrir al menos desde 250 Hz a 2000 Hz para el método de control. Para los métodos de ingeniería y de precisión, el rango de frecuencias debería cubrir al menos desde 125 Hz a 4000 Hz en bandas de octava, o desde 100 Hz a 5000 Hz en bandas de un tercio de octava.

En nuestro caso, hemos decidido efectuar las medidas para 3 posiciones de fuente y 4 posiciones de micrófono por cada una de las posiciones de la fuente. En definitiva, un total de 12 mediciones se llevaron a cabo. A continuación, se muestran cada una de las posiciones de medidas, tanto de la fuente como de los micrófonos:





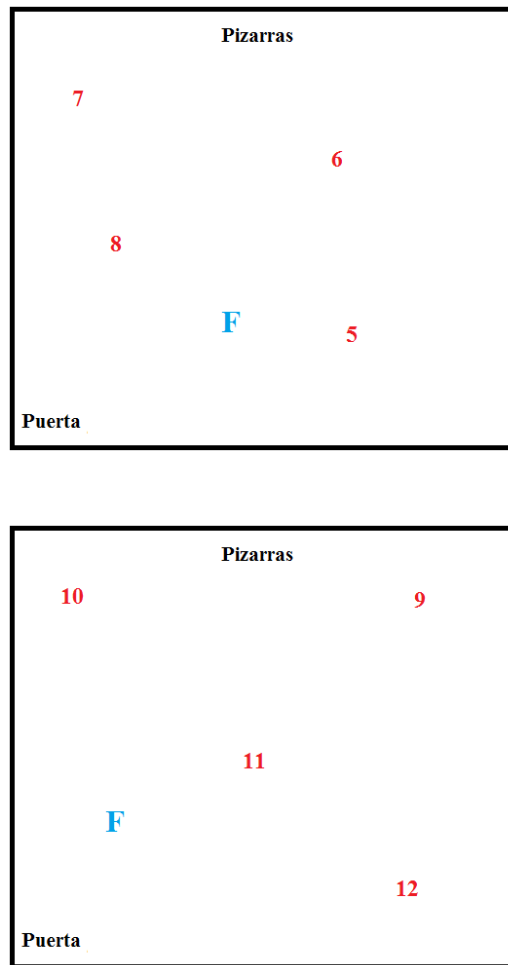


Figura 4.13 Posiciones de la fuente y los micrófonos durante las mediciones en el aula 008

Algunas de las recomendaciones que se siguieron a la hora de realizar las diferentes medidas del tiempo de reverberación fueron las que se detallan a continuación:

- Posiciones entre micrófonos separadas 2 m para el margen de frecuencias habitual.
- La distancia entre el micrófono y cualquier superficie reflectante, incluido el suelo, será de, al menos, 1 m para el margen de frecuencias habitual.
- Se deberán evitar posiciones simétricas y cercanas.
- Ninguna posición de micrófono deberá estar cercana a la fuente para intentar evitar una influencia excesiva del sonido directo. La distancia mínima podrá ser:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{V}{c\hat{T}}}$$

donde

$V$ , es el volumen, en metros cúbicos;

$c$ , es la velocidad del sonido, en metros por segundos;

$\hat{T}$ , es una estimación del tiempo de reverberación esperado, en segundos.

En el caso del aula 008, la distancia mínima sería aproximadamente 1 m.

Estas recomendaciones no solo se tuvieron en cuenta a la hora de medir el tiempo de reverberación, sino también el ruido de fondo y los distintos parámetros de inteligibilidad.

Cuando se desea medir el tiempo de reverberación en un recinto, la norma recoge dos métodos de medida basados en el tipo de señal de excitación de la sala: el método del ruido interrumpido y el método de respuesta impulsiva integrada. El rango de frecuencias que se deben cubrir son las bandas de octava 125 Hz a 4000 Hz para ambos métodos.

El método del ruido interrumpido consiste en la obtención de curvas de decrecimiento del nivel de presión sonora de una sala mediante la excitación de la misma, con un ruido de banda ancha aleatorio o pseudoaleatorio; habitualmente, se emplea ruido rosa por tener un nivel espectral constante por bandas de 1/n octavas. Se realiza la excitación de la sala hasta que esta alcanza el estado estacionario, momento en el que se para la fuente y se recoge la caída de nivel. El nivel en estado estacionario ha

de estar 35 dB o 45 dB por encima del nivel del ruido de fondo para poder garantizar la medida del tiempo de reverberación de la sala.

En el método de la respuesta impulsiva integrada, la señal de excitación ideal es un impulso o delta de Dirac. A partir de él y mediante la integración inversa de la respuesta de la sala al cuadrado para cada banda de octava o tercio de octava se obtienen las curvas de decrecimiento. Al ser imposible generar una delta perfecta, se utilizan salvos, barridos sinusoidales o secuencias de longitud máxima (Maximum Length Sequence - MLS) para excitar la sala. De nuevo es necesario un margen dinámico de 35 dB o 45 dB entre el nivel de pico y el valor del ruido de fondo.

En el caso que nos ocupa, el método del ruido interrumpido fue el elegido, empleando un ruido rosa como señal sonora.

#### **4.5.3 Medición de los distintos parámetros de inteligibilidad**

Para realizar las medidas de los parámetros de inteligibilidad más representativos de un aula, como son EDT,  $C_{50}$ ,  $D_{50}$ , STI y RASTI, se siguió un procedimiento de medida similar al método del tiempo de reverberación, pues se hicieron igualmente 12 medidas y las posiciones de fuente y micrófono se conservaron. El método de medida cambió; en este caso, se utilizó el método de respuesta impulsiva integrada, utilizando secuencias de longitud máxima (MLS) como señales.

Los parámetros acústicos de un sistema lineal (como por ejemplo un aula) se pueden obtener mediante la respuesta al impulso entre una fuente y un receptor. Para obtener esa respuesta se pueden utilizar infinidad de excitaciones distintas como pueden ser la explosión de un globo de aire, disparos, petardos..., pero la fidelidad o la repetitividad de estas puede no ser la adecuada. Es la razón por la se prefiere una excitación con una señal estacionaria, ya que ofrece una mayor precisión del resultado.

Sin embargo, el proceso de medición y la carga de cálculo solo podrían ser llevados a cabo en equipos con una gran potencia computacional.

La técnica MLS nos permite realizar mediciones de respuesta de impulso que, una vez que se han filtrado por bandas de frecuencias, nos dará acceso a los tiempos de reverberación y espectros de la señal.

El método MLS se basa en la correlación cruzada entre una excitación de entrada y una señal de salida a través de un sistema lineal, donde la excitación es una señal pseudoaleatoria periódica representada de forma binaria con 1 y -1 y una longitud  $L = 2^n - 1$ , donde n es un número entero.

El programa CATT Acoustic, a la hora de realizar las medidas de los diferentes parámetros de inteligibilidad, nos pide que definamos los parámetros que se van a utilizar en la técnica MLS. Nos basaremos en el estudio “Comparison of different impulse response measurement techniques” [21] para definir dichos parámetros y conseguir así que la medición sea la adecuada.

La emisión de una secuencia pseudoaleatoria binaria de longitud máxima (muy similar al ruido blanco) y la medición simultánea en un punto de una habitación dada nos permitirán realizar mediciones más precisas, con gran dinámica y en presencia de ruido de fondo. Por consiguiente, MLS es una técnica de medición eficiente en ambientes ruidosos que funciona sin una fuente de ruido potente y que permite obtener resultados más precisos que los métodos tradicionales.

## **Capítulo V. Análisis de los resultados.**

## Capítulo V. Análisis de los resultados.

### 5.1 Preámbulo

En este capítulo se plasman los valores medidos de todas las mediciones realizadas, así como el valor promedio de cada una de ellas.

Además, todos estos datos serán comparados con los valores óptimos correspondientes a salas destinadas a la palabra.

### 5.2 Resultados y análisis de las mediciones

#### 5.2.1 Ruido de fondo

Como se comentó en el capítulo anterior, fueron seis las medidas de ruido de fondo que se hicieron en el aula. Un diagrama como el que se muestra en la siguiente figura es el que proporcionaba el programa cada vez que se hacía una medición. En este se puede observar el nivel de ruido de fondo para cada una de las bandas de frecuencia.

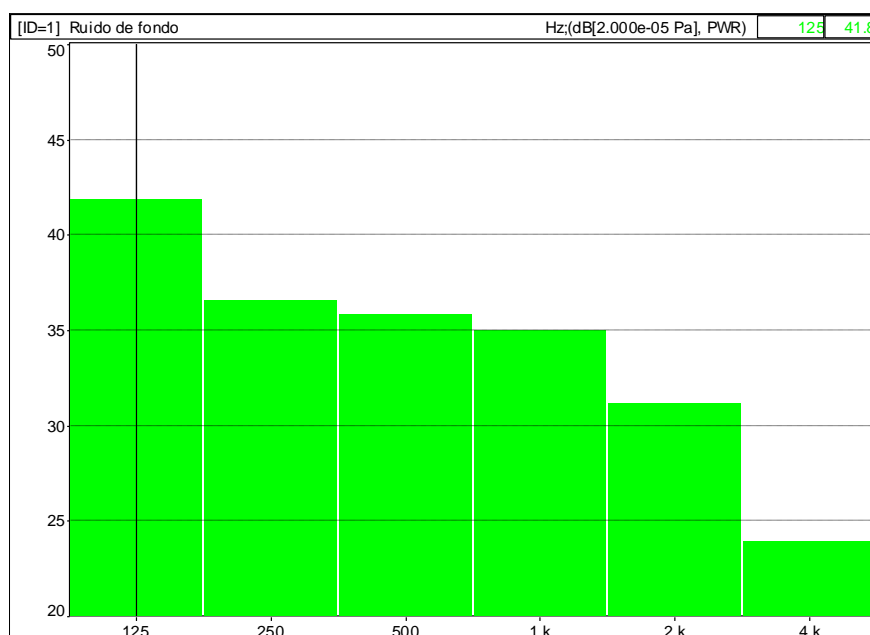


Figura 5.1 Diagrama de la primera medida del ruido de fondo

A continuación, se muestran los valores de cada una de ellas y el promedio de las seis medidas:

Medida 1	
Hz	dB
125	41,8
250	36,5
500	35,8
1 k	35,0
2 k	31,1
4 k	23,9
Global A*	39,0
Global Lin*	44,5

Medida 2	
Hz	dB
125	44,6
250	38,2
500	39,4
1 k	34,8
2 k	31,2
4 k	20,8
Global A*	40,3
Global Lin*	46,9

Medida 3	
Hz	dB
125	43,8
250	38,3
500	33,2
1 k	28,9
2 k	25,1
4 k	17,6
Global A*	35,8
Global Lin*	45,3

Medida 4	
Hz	dB
125	44,9
250	35,4
500	34,4
1 k	29,8
2 k	27,1
4 k	17,1
Global A*	36,3
Global Lin*	45,9

Medida 5	
Hz	dB
125	37,2
250	36,5
500	37,7
1 k	34,1
2 k	31,1
4 k	20,7
Global A*	39,0
Global Lin*	42,9

Medida 6	
Hz	dB
125	36,3
250	37,9
500	35,5
1 k	30,8
2 k	28,0
4 k	18,2
Global A*	36,7
Global Lin*	42,0

Promedio	
Hz	dB
125	41,4
250	37,1
500	36,0
1 k	32,2
2 k	28,9
4 k	19,7
Global A*	37,9
Global Lin*	44,6

En las tablas anteriores se observa que el ruido de fondo medido es de baja frecuencia, pues es la frecuencia de 125 Hz la que presenta un nivel de presión sonora más elevado.

Como se expuso en el Capítulo III, las curvas Noise Criteria (NC) sirven para determinar el nivel de ruido máximo recomendado dependiendo de la funcionalidad de

la sala. Un recinto cumplirá una determinada curva NC si sus niveles de ruido de fondo se encuentran por debajo de la curva NC correspondiente en todas las bandas de octava.

En el caso de las aulas de enseñanza, los valores medidos deberían estar comprendidos entre las curvas NC 20 y 30. Comparando los valores promedio con dichas curvas, podemos observar en la figura 5.2 que en la mayoría de las frecuencias, el valor medido se encuentra por debajo del valor recomendado; excepto en las bandas de 500 Hz y 1000 Hz, que el valor medido es ligeramente superior.

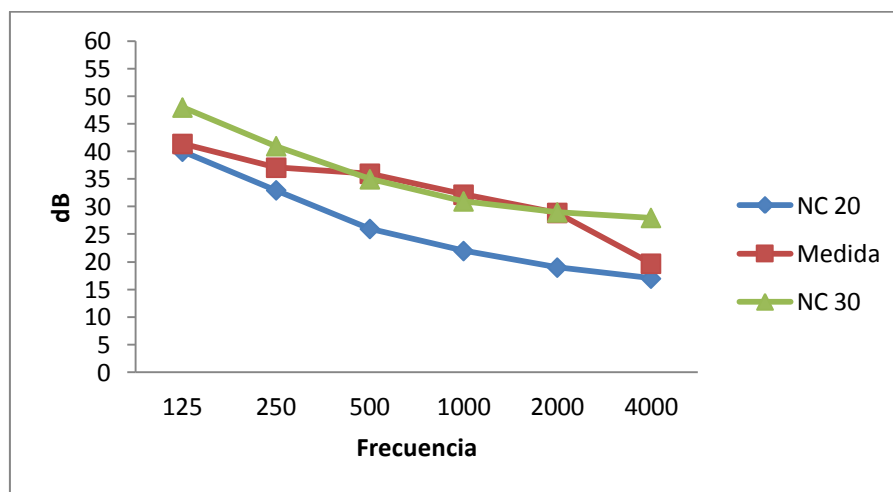


Figura 5.2 Comparación de la curva medida con las curvas NC recomendadas para aulas de enseñanza

El no cumplimiento de esta especificación para el ruido de fondo supone un deterioro en el confort acústico del aula así como en la inteligibilidad de la palabra, aunque como se observa en el gráfico anterior, en nuestro caso no supondría una gran pérdida de la misma.

### 5.2.2 Tiempo de reverberación

Fueron doce las medidas que se hicieron del tiempo de reverberación. Para cada una de ellas el programa dBati32 proporcionaba las curvas de decrecimiento en cada banda de frecuencia, tal y como se observa en la siguiente imagen:



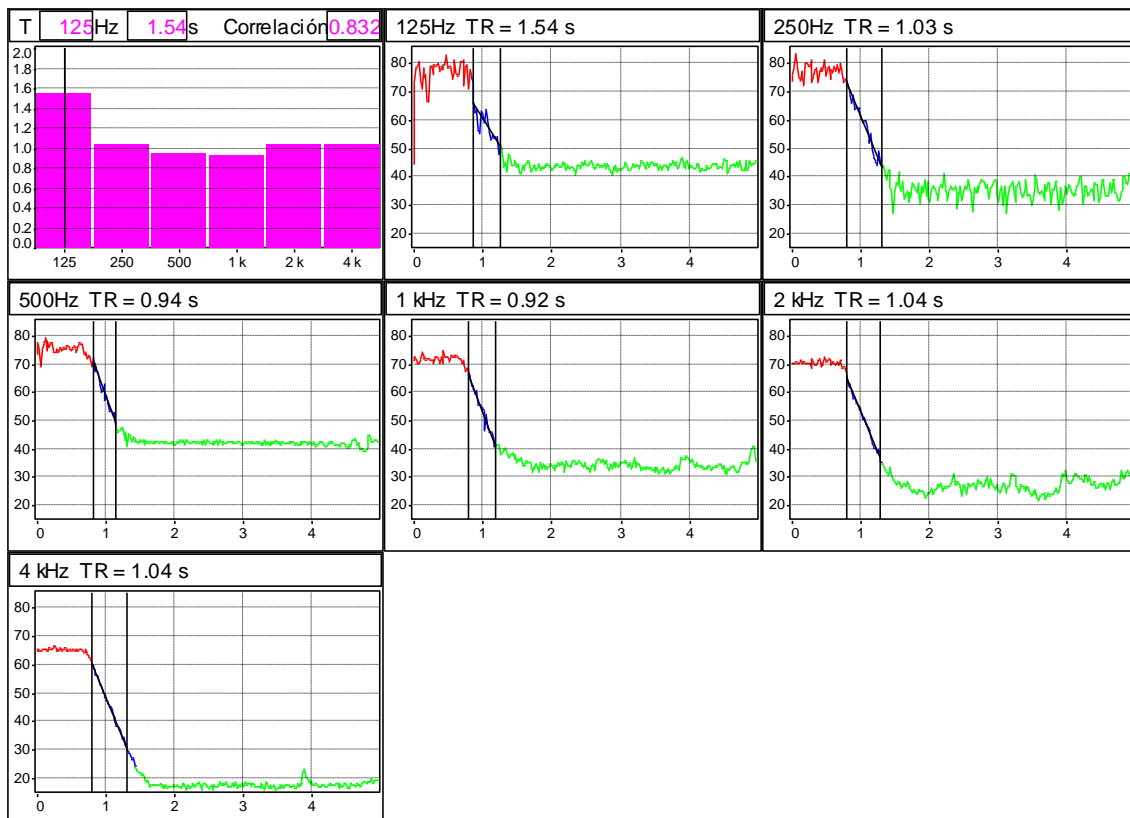


Figura 5.3 Diagrama y curvas de decrecimiento correspondientes a la primera medida del tiempo de reverberación

La siguiente tabla recoge los valores medidos del tiempo de reverberación así como el valor promedio de las doce medidas:

Medida 1	
Hz	s
125	1,54
250	1,03
500	0,94
1 k	0,92
2 k	1,04
4 k	1,04

Medida 5	
Hz	s
125	0,96
250	1,06
500	1,03
1 k	0,86
2 k	0,93
4 k	0,98

Medida 9	
Hz	s
125	1,36
250	0,99
500	1,10
1 k	0,96
2 k	1,00
4 k	1,00

Medida 2	
Hz	s
125	0,83
250	0,88
500	0,91
1 k	0,95
2 k	0,95
4 k	0,96

Medida 6	
Hz	s
125	1,05
250	1,05
500	1,05
1 k	1,02
2 k	0,98
4 k	1,01

Medida 10	
Hz	s
125	1,24
250	0,95
500	0,95
1 k	0,92
2 k	0,99
4 k	1,01

Medida 3	
Hz	s
125	0,83
250	1,04
500	0,95
1 k	0,95
2 k	0,98
4 k	1,01

Medida 7	
Hz	s
125	0,95
250	1,05
500	1,01
1 k	0,93
2 k	0,96
4 k	0,99

Medida 11	
Hz	s
125	1,12
250	0,96
500	0,97
1 k	0,91
2 k	0,96
4 k	0,98

Medida 4	
Hz	s
125	0,99
250	0,98
500	1,05
1 k	0,90
2 k	0,98
4 k	1,00

Medida 8	
Hz	s
125	0,96
250	1,14
500	1,03
1 k	0,91
2 k	0,96
4 k	1,00

Medida 12	
Hz	s
125	1,19
250	0,98
500	1,11
1 k	0,97
2 k	0,99
4 k	1,00

Promedio	
Hz	s
125	1,09
250	1,01
500	1,01
1 k	0,93
2 k	0,98
4 k	1,00

<b>TR<sub>mid</sub></b>	0,97
-------------------------	------

Como valor más representativo se ha calculado el tiempo de reverberación medio (TR<sub>mid</sub>), media aritmética de las frecuencias de 500 Hz y 1 kHz, obteniendo un valor de 0,97 segundos, valor superior al recomendado (0,5 segundos) para una sala destinada a la palabra.

### 5.2.3 Diferentes parámetros de inteligibilidad

En cada una de las medidas realizadas para obtener los distintos parámetros de inteligibilidad, el software proporcionaba la figura que se presenta a continuación, en la que no solo aparecen dichos parámetros sino también el tiempo de reverberación medido mediante el método de respuesta impulsiva integrada.

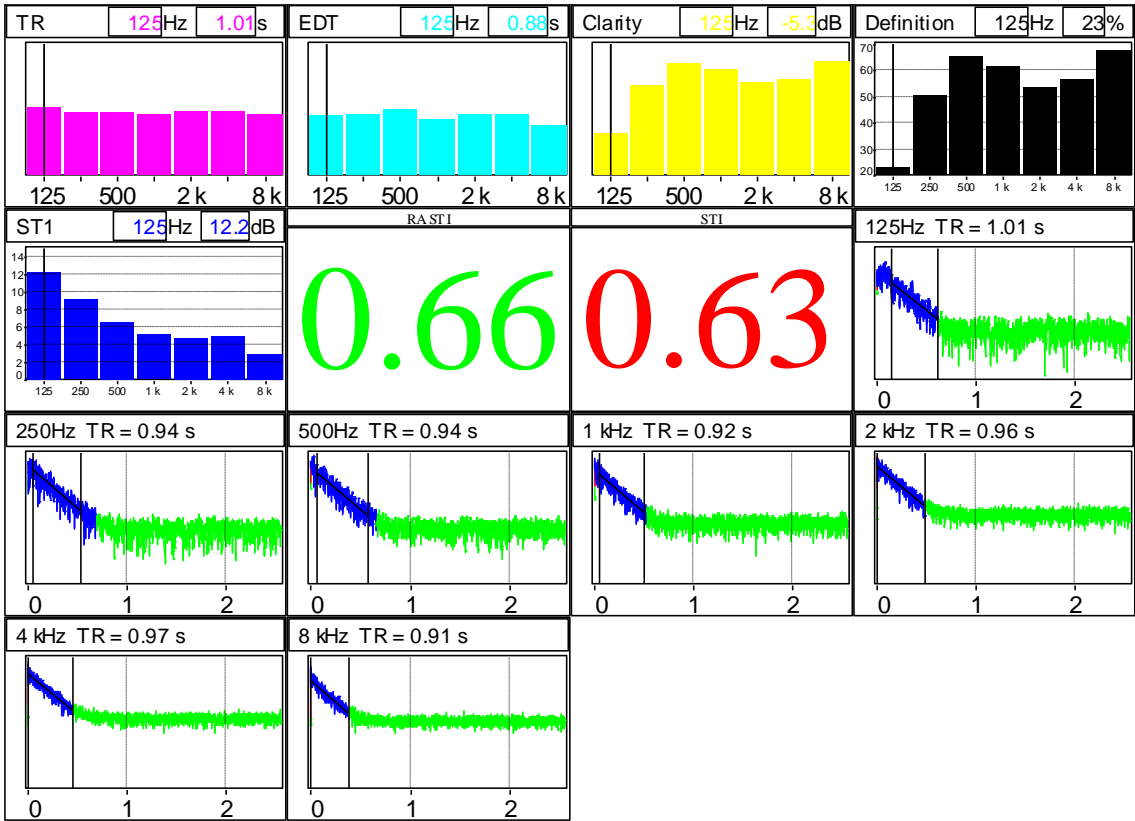


Figura 5.4 Valores de la primera medición de los distintos parámetros de inteligibilidad

5.2.3.1 EDT

La siguiente tabla muestra los valores medidos de EDT para las siete bandas de frecuencia comprendidas entre 125 Hz y 8 kHz:

EDT		EDT		EDT	
Medida 1		Medida 2		Medida 3	
Hz	S	Hz	s	Hz	s
125	0,88	125	1,37	125	0,90
250	0,91	250	0,71	250	0,86
500	1,00	500	0,97	500	0,79
1 k	0,84	1 k	0,96	1 k	0,81
2 k	0,92	2 k	0,91	2 k	1,02
4 k	0,91	4 k	0,95	4 k	1,01
8 k	0,74	8 k	0,82	8 k	0,78

EDT	
Medida 4	
Hz	S
125	0,29
250	1,14
500	0,86
1 k	0,79
2 k	1,02
4 k	0,93
8 k	0,97

EDT	
Medida 5	
Hz	s
125	1,90
250	0,46
500	0,99
1 k	1,02
2 k	1,19
4 k	1,17
8 k	0,89

EDT	
Medida 6	
Hz	s
125	4,00
250	1,00
500	0,91
1 k	0,89
2 k	1,20
4 k	1,13
8 k	0,87

EDT	
Medida 7	
Hz	S
125	0,40
250	1,05
500	1,15
1 k	1,11
2 k	0,94
4 k	1,07
8 k	0,86

EDT	
Medida 8	
Hz	s
125	2,75
250	1,22
500	1,04
1 k	0,78
2 k	0,95
4 k	0,94
8 k	0,95

EDT	
Medida 9	
Hz	s
125	1,22
250	1,61
500	1,14
1 k	0,74
2 k	1,05
4 k	1,26
8 k	0,96

EDT	
Medida 10	
Hz	S
125	2,29
250	1,74
500	1,18
1 k	0,88
2 k	0,99
4 k	1,06
8 k	0,93

EDT	
Medida 11	
Hz	s
125	5,47
250	1,09
500	1,11
1 k	0,62
2 k	0,95
4 k	0,90
8 k	0,88

EDT	
Medida 12	
Hz	s
125	1,02
250	1,42
500	0,85
1 k	0,93
2 k	0,90
4 k	1,06
8 k	0,71

El valor promedio de EDT sería:

EDT	
Promedio	
Hz	s
125	2,21
250	1,17
500	1,03
1 k	0,87
2 k	1,02
4 k	1,06
8 k	0,88

<b>EDT<sub>mid</sub></b>	0,95
--------------------------	------

Estos resultados demuestran que los valores de EDT son muy parecidos a los de TR en todas las frecuencias, por lo que se puede decir que la reverberación percibida y la reverberación real en el aula son muy similares.

### 5.2.3.2 D<sub>50</sub>

Los resultados obtenidos de la medición de D<sub>50</sub> son los siguientes:

Definición	
Medida 1	
Hz	%
125	23,0
250	50,3
500	65,2
1 k	60,9
2 k	53,3
4 k	55,7
8 k	66,5

Definición	
Medida 2	
Hz	%
125	52,9
250	62,0
500	56,0
1 k	56,6
2 k	54,4
4 k	56,9
8 k	64,2

Definición	
Medida 3	
Hz	%
125	67,6
250	41,1
500	57,3
1 k	52,3
2 k	55,6
4 k	57,9
8 k	60,2

Definición	
Medida 4	
Hz	%
125	72,8
250	53,4
500	46,8
1 k	52,6
2 k	39,3
4 k	49,1
8 k	48,8

Definición	
Medida 5	
Hz	%
125	61,3
250	68,2
500	44,5
1 k	49,0
2 k	50,1
4 k	54,1
8 k	63,9

Definición	
Medida 6	
Hz	%
125	60,1
250	56,0
500	52,4
1 k	57,4
2 k	42,3
4 k	48,0
8 k	55,9

Definición	
Medida 7	
Hz	%
125	52,2
250	48,2
500	42,2
1 k	51,5
2 k	50,6
4 k	51,3
8 k	51,6

Definición	
Medida 8	
Hz	%
125	54,5
250	59,9
500	50,8
1 k	65,1
2 k	68,3
4 k	62,7
8 k	58,3

Definición	
Medida 9	
Hz	%
125	60,0
250	32,7
500	40,7
1 k	41,8
2 k	49,8
4 k	46,8
8 k	40,3

Definición	
Medida 10	
Hz	%
125	8,8
250	56,3
500	59,9
1 k	54,0
2 k	48,2
4 k	51,1
8 k	51,3

Definición	
Medida 11	
Hz	%
125	21,3
250	50,2
500	56,9
1 k	65,5
2 k	64,4
4 k	55,1
8 k	55,1

Definición	
Medida 12	
Hz	%
125	55,4
250	59,0
500	58,4
1 k	61,8
2 k	48,0
4 k	59,1
8 k	62,6

Haciendo la media de los valores anteriores para cada una de las bandas de frecuencias se obtiene el valor promedio de  $D_{50}$ :

Definición	
Promedio	
Hz	%
125	49,2
250	53,1
500	52,6
1 k	55,7
2 k	52,0
4 k	54,0
8 k	56,6

Calculando el valor medio de  $D_{50}$  entre las bandas de 500 Hz y 1 kHz, obtenemos el porcentaje de energía que llega en los primeros 50 ms respecto a la energía total, cuyo valor es de 54,2%, inferior al 65% recomendado para aulas de enseñanza.

Además, comparando estos valores promedio con los valores promedio del tiempo de reverberación, podemos observar como siguen tendencias opuestas, es decir, el tiempo de reverberación va disminuyendo a medida que la frecuencia aumenta, excepto en las frecuencias más altas, que aumenta. Sin embargo, la definición aumenta a medida que la frecuencia lo hace, mientras que en las frecuencias más altas, disminuye. Esta tendencia opuesta entre el tiempo de reverberación y la definición es lógica, ya que un valor bajo de la definición muestra que la energía sonora reflejada en los primeros 50 ms es pequeña en relación con la energía reflejada total, lo que quiere decir que el tiempo de reverberación es excesivo, haciendo el recinto muy “vivo”. Conviene que el tiempo de reverberación sea menor para que las reflexiones se concentren en los primeros 50 ms y así, aumente la definición.

### 5.2.3.3 $C_{50}$

Los resultados obtenidos de la medición de la claridad de la voz  $C_{50}$  son los siguientes:

Claridad	
Medida 1	
Hz	dB
125	-5,3
250	0,1
500	2,7
1 k	1,9
2 k	0,6
4 k	0,9
8 k	2,9

Claridad	
Medida 2	
Hz	dB
125	0,4
250	2,1
500	0,8
1 k	1,0
2 k	0,7
4 k	1,2
8 k	2,5

Claridad	
Medida 3	
Hz	dB
125	3,2
250	-1,6
500	1,2
1 k	0,3
2 k	0,9
4 k	1,4
8 k	1,7

Claridad	
Medida 4	
Hz	dB
125	3,9
250	0,6
500	-0,6
1 k	0,4
2 k	-1,9
4 k	-0,2
8 k	-0,3

Claridad	
Medida 5	
Hz	dB
125	1,9
250	3,3
500	-1,0
1 k	-0,4
2 k	0,0
4 k	0,6
8 k	2,4

Claridad	
Medida 6	
Hz	dB
125	1,7
250	1,0
500	0,4
1 k	1,3
2 k	-1,4
4 k	-0,4
8 k	0,9

Claridad	
Medida 7	
Hz	dB
125	0,3
250	-0,4
500	-1,4
1 k	0,2
2 k	0,1
4 k	0,1
8 k	0,2

Claridad	
Medida 8	
Hz	dB
125	0,7
250	1,7
500	0,0
1 k	2,6
2 k	3,3
4 k	2,2
8 k	1,4

Claridad	
Medida 9	
Hz	dB
125	1,8
250	-3,1
500	-1,6
1 k	-1,4
2 k	-0,1
4 k	-0,6
8 k	-1,8



Claridad	
Medida 10	
Hz	dB
125	-10,1
250	1,0
500	1,4
1 k	0,6
2 k	-0,4
4 k	0,1
8 k	0,1

Claridad	
Medida 11	
Hz	dB
125	-5,7
250	0,0
500	1,1
1 k	2,7
2 k	2,5
4 k	0,8
8 k	0,9

Claridad	
Medida 12	
Hz	dB
125	0,9
250	1,5
500	1,5
1 k	2,1
2 k	-0,4
4 k	1,6
8 k	2,1

El promedio de  $C_{50}$  es el siguiente:

Claridad	
Promedio	
Hz	dB
125	-0,5
250	0,5
500	0,4
1 k	0,9
2 k	0,3
4 k	0,6
8 k	1,1

Como se comentó en el Capítulo III, el valor representativo de  $C_{50}$  (relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo y la que le llega después de los primeros 50 ms) se calcula como la media aritmética ponderada de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz, y recibe el nombre de “speech average”. Los factores de ponderación son: 15%, 25%, 35% y 25%, respectivamente, de acuerdo con la contribución estadística aproximada de cada banda a la inteligibilidad de la palabra. De este modo:

$C_{50}$  ("speech average")

$$= 0,15 \cdot C_{50} (500 \text{ Hz}) + 0,25 \cdot C_{50} (1\text{kHz}) + 0,35 \cdot C_{50} (2\text{kHz}) + 0,25 \cdot C_{50} (4 \text{ kHz}) = 0,15 \cdot 0,4 + 0,25 \cdot 0,9 + 0,35 \cdot 0,3 + 0,25 \cdot 0,6 = 0,54$$

El valor recomendado de  $C_{50}$  ("speech average") correspondiente a un aula debe ser mayor de 2,5 dB, valor que no alcanza el medido en el aula; por tanto, perjudicará a la inteligibilidad.

De la tabla anterior, además de obtener el valor de  $C_{50}$  ("speech average"), podemos obtener valores que relacionan la claridad con la definición mediante la expresión vista en el Capítulo III:

$$D = \frac{1}{1 + 10^{\frac{-C_{50}}{10}}}$$

De esta expresión se deduce que, por ejemplo, un valor negativo de la tabla anterior, corresponde a un porcentaje de definición inferior al 50%.

#### 5.2.3.4 STI y RASTI

Por último, se muestran los resultados obtenidos de los índices que cuantifican la inteligibilidad:

Criterios de sala	
Medida 1	
Valor	0-1
STI	0,63
RASTI	0,66

Criterios de sala	
Medida 2	
Valor	0-1
STI	0,64
RASTI	0,65

Criterios de sala	
Medida 3	
Valor	0-1
STI	0,63
RASTI	0,64

Criterios de sala	
Medida 4	
Valor	0-1
STI	0,61
RASTI	0,62

Criterios de sala	
Medida 5	
Valor	0-1
STI	0,61
RASTI	0,61

Criterios de sala	
Medida 6	
Valor	0-1
STI	0,60
RASTI	0,61

Criterios de sala	
Medida 7	
Valor	0-1
STI	0,61
RASTI	0,60

Criterios de sala	
Medida 8	
Valor	0-1
STI	0,63
RASTI	0,64

Criterios de sala	
Medida 9	
Valor	0-1
STI	0,59
RASTI	0,61

Criterios de sala	
Medida 10	
Valor	0-1
STI	0,61
RASTI	0,64

Criterios de sala	
Medida 11	
Valor	0-1
STI	0,62
RASTI	0,63

Criterios de sala	
Medida 12	
Valor	0-1
STI	0,63
RASTI	0,64

Criterios de sala	
Promedio	
Valor	0-1
STI	0,62
RASTI	0,63

Aunque, en este caso, ambos valores son muy similares, casi idénticos, el STI es más fiable que el RASTI, ya que este último es una aproximación derivada de él.

Existen estudios [15] que corroboran que la diferencia entre el STI y el RASTI no es significativa cuando la diferencia entre el nivel de señal sonora y el nivel de ruido de fondo es elevada, tal y como es nuestro caso.

Relacionando los valores resultantes de STI y RASTI con la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad, se puede decir que el aula tiene una inteligibilidad aceptable.

<b>%ALCons</b>	<b>STI/RASTI</b>	<b>Valoración subjetiva</b>
1,4% - 0%	0,88 – 1	Excelente
4,8% - 1,6%	0,66 - 0,86	Buena
11,4% - 5,3%	0,50 - 0,64	Aceptable
24,2% - 12%	0,36 - 0,49	Pobre
46,5% - 27%	0,24 - 0,34	Mala

Figura 5.5 Relación entre %ALCons, STI/RASTI y la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad

[17]

## **Capítulo VI. Predicción acústica del aula.**

## **Capítulo VI. Predicción acústica del aula.**

### **6.1 Preámbulo**

Tal y como se ha demostrado en el capítulo anterior, se puede decir que el aula 008 no tiene un buen comportamiento acústico, pues los valores de las mediciones realizadas no cumplen las condiciones establecidas por la normativa ni por las recomendaciones de algunos autores. Por tanto, se van a analizar qué posibles medidas de mejora se podrían aplicar, incidiendo sobre todos los parámetros acústicos estudiados.

Una vez que el aula está ya construida, como es nuestro caso, las posibilidades de mejora son menores que si el aula está en fase de diseño, de ahí que en este proyecto las mejoras se puedan ver algo limitadas. Nos centraremos principalmente en los materiales que componen el aula y en la geometría de la misma para poder mejorar la acústica del recinto.

El programa que se ha utilizado para simular las condiciones acústicas actuales del aula y también para simular las mejoras es el software CATT Acoustic, el cual permite diseñar salas para su posterior análisis acústico.

### **6.2 Validación de la simulación**

Lo primero que se hará con CATT Acoustic será simular las condiciones acústicas del aula objeto de estudio definiendo su geometría y sus materiales, con el fin de comparar entre los resultados medidos y simulados, para así determinar la precisión con la que el software se ajusta a las medidas.

La precisión de los cálculos vendrá determinada, por una parte, por los métodos de cálculo que utiliza el programa de simulación y, por otra, por el grado de detalle geométrico de la sala así como por la definición de los materiales, introducidos por el usuario, que en nuestro caso es el más fiel posible a la realidad.

El programa CATT Acoustic, a la hora de predecir la acústica de un recinto, utiliza algoritmos de trazado de conos. Nos ofrece tres algoritmos diferentes de cálculo. En este proyecto se utilizará el primero de ellos, ya que es el que mejor se adapta al aula 008, pues el algoritmo 1 corresponde a espacios cerrados mientras que los algoritmos 2 y 3 se utilizan para espacios al aire libre o espacios muy abiertos.

A continuación se muestra el esquema del algoritmo 1 de CATT Acoustic:

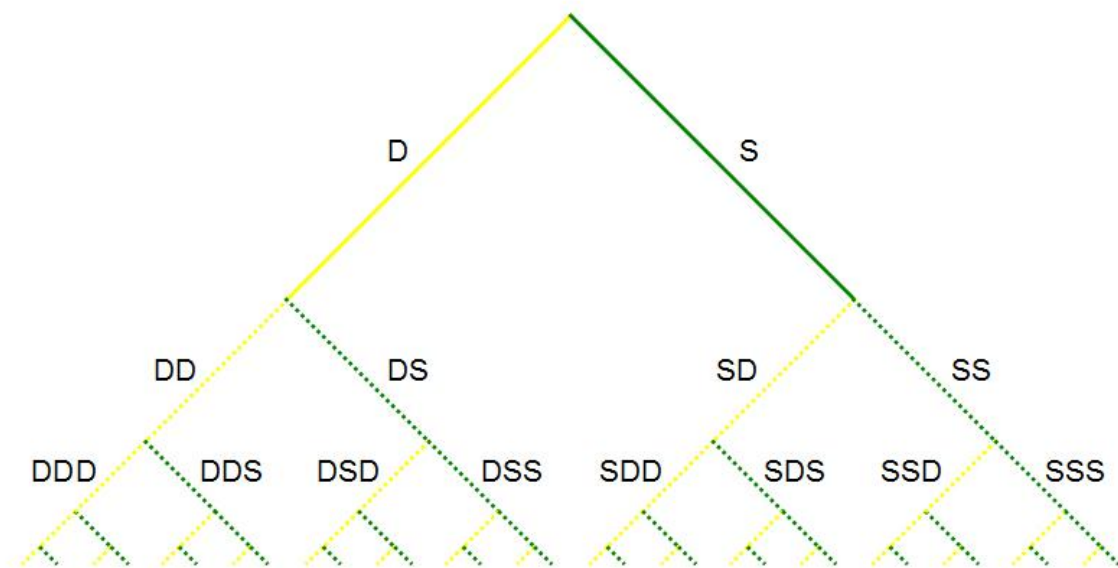


Figura 6.1 Esquema del algoritmo de CATT Acoustic [8]

El esquema anterior pretende demostrar que el sonido directo y la reflexión especular de primer orden son deterministas (en la figura, en líneas continuas). A partir de la segunda reflexión, la reflexión especular y difusa se realiza aleatoriamente. Es decir, si se tiene un coeficiente de difusión de 0,5, la mitad de los rayos se refleja

especularmente y la otra mitad sigue la dirección de dispersión según la distribución de Lambert, es decir, la energía dispersada es proporcional a  $\cos \theta$ .

Se sabe que aquellos programas que incluyen la difusión son los que producen resultados de confianza. El uso de coeficientes de difusión en los programas de simulación no es una simple forma de hacer los programas realistas, es también una herramienta que permite al usuario ajustar su modelo a los datos experimentales [5].

Para poder simular el aula 008 en el software es necesario introducir el ruido de fondo existente en la sala, definir la geometría del aula, los coeficientes de absorción y difusión de los distintos materiales, así como una fuente de sonido y un receptor.

La geometría fue simulada definiendo las coordenadas de los distintos puntos que conformaban los planos del aula. En cuanto a los materiales, en la siguiente figura se pueden ver los coeficientes de absorción y difusión para cada banda de frecuencia de las distintas superficies del aula:

Coeficiente(%) / Frecuencia	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
-----------------------------	--------	--------	--------	-------	-------	-------

<b>Absorción:</b>						
<b>Audiencia</b>	56	64	70	72	68	62
<b>Paredes de ladrillo</b>	1	1	2	2	2	3
<b>Paredes de madera</b>	19	14	9	6	6	5
<b>Pizarras</b>	3	3	3	3	3	3
<b>Techo de yeso</b>	10	8	5	5	4	4
<b>Puerta y ventanas de vidrio</b>	35	25	18	12	7	4

<b>Difusión:</b>						
<b>Audiencia</b>	40	50	60	60	60	60
<b>Paredes de ladrillo</b>	20	20	20	20	20	20
<b>Paredes de madera</b>	20	20	20	20	20	20
<b>Pizarras</b>	10	10	10	10	10	10
<b>Techo de yeso</b>	20	20	20	20	20	20
<b>Puerta y ventanas de vidrio</b>	10	10	10	10	10	10

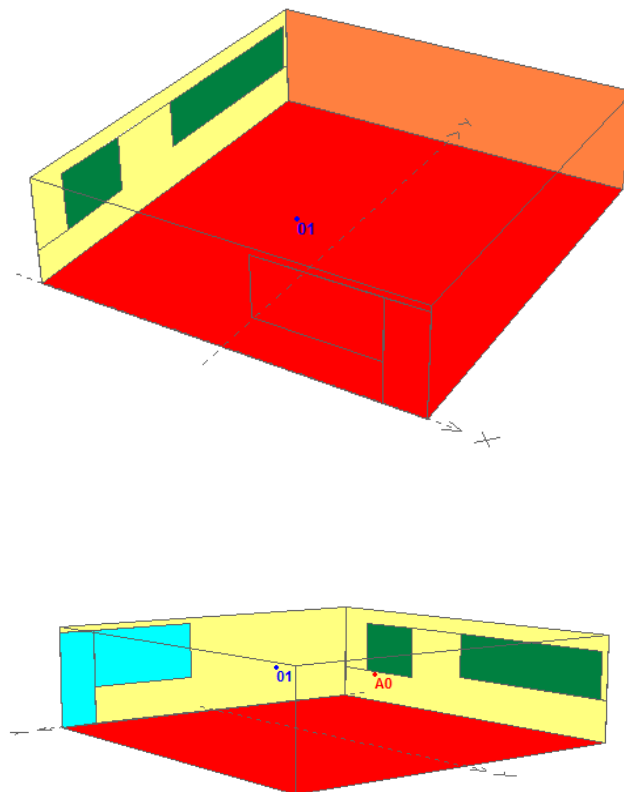


Figura 6.2 Coeficientes de absorción y difusión de los materiales del aula 008 introducidos en la simulación

El concepto de audiencia en la tabla anterior, además del suelo, engloba todo el mobiliario del aula.

Respecto a la fuente y el receptor, se definieron sus coordenadas de posición, las cuales corresponden a la primera posición, tanto de fuente como de micrófono, de las doce mediciones realizadas. Cabe destacar también que la fuente definida en el programa (80 dB) es omnidireccional, igual que la que se utilizó en las mediciones.

A continuación, se muestran diferentes perspectivas del aula simulada por el programa CATT Acoustic:



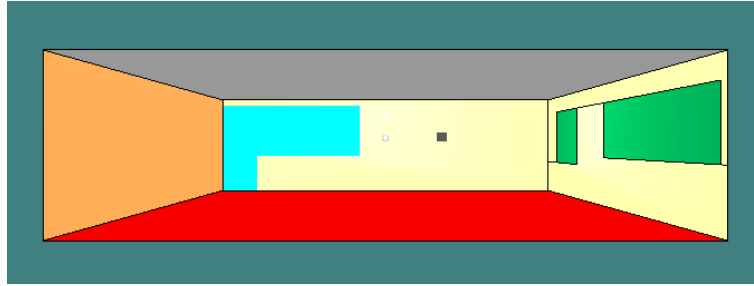


Figura 6.3 Diferentes vistas del aula 008 simulada en el programa CATT Acoustic

En las imágenes anteriores se pueden apreciar las posiciones de la fuente (A0) y del receptor (01), así como los distintos colores de las superficies del aula, cada uno de ellos correspondiente a un material.

El software CATT Acoustic, además de proporcionar los valores de los distintos parámetros acústicos, también ofrece mapas de sonido directo y de numerosos parámetros acústicos como  $D_{50}$ ,  $C_{50}$  o STI.

En las siguientes figuras se muestran los mapas correspondientes al sonido directo, al sonido global (sonido directo + sonido reflejado) y a los parámetros acústicos  $D_{50}$ ,  $C_{50}$  y STI.

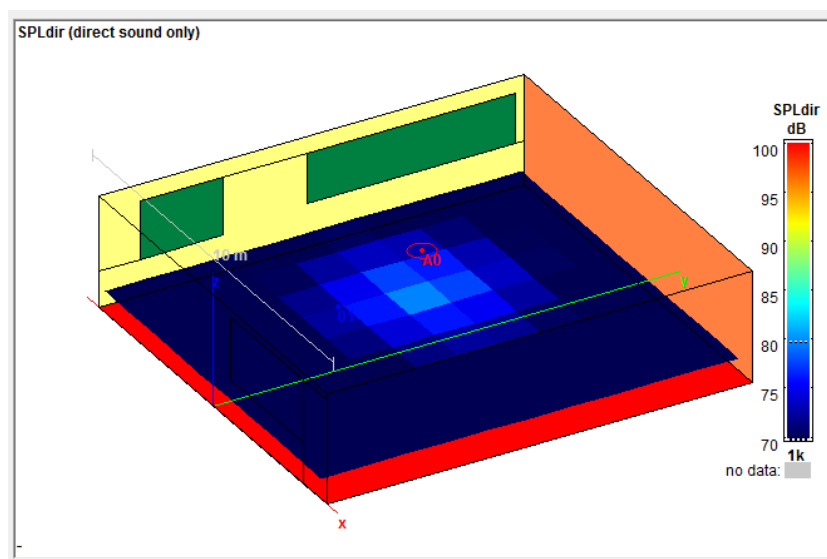


Figura 6.4 Mapa del sonido directo del aula 008

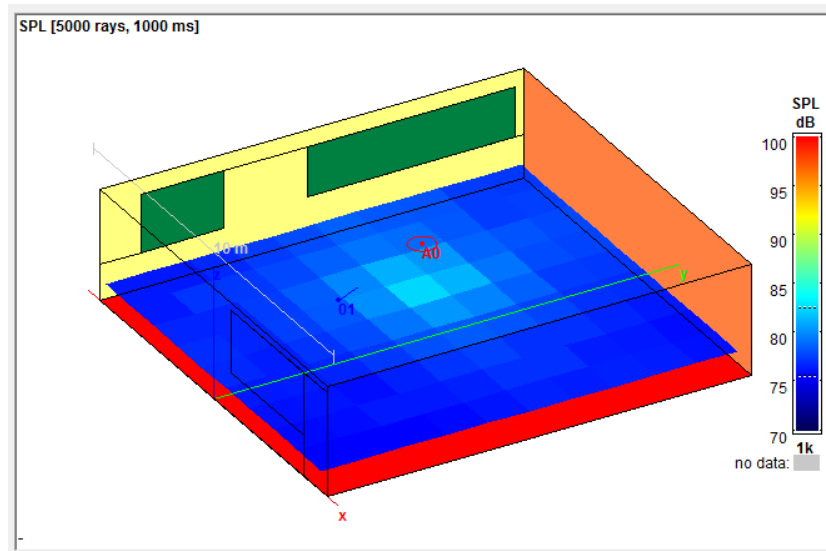


Figura 6.5 Mapa del sonido global (sonido directo + sonido reflejado) del aula 008

Se puede apreciar como en las zonas cercanas a la fuente, tanto para el sonido directo como para el sonido global, el nivel de presión sonora es mayor que en otras zonas del aula.

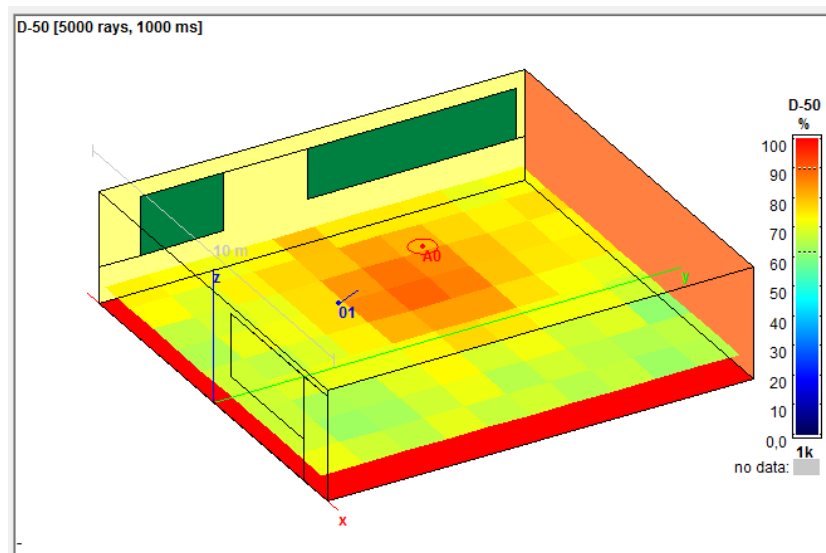


Figura 6.6 Mapa del parámetro  $D_{50}$  del aula 008

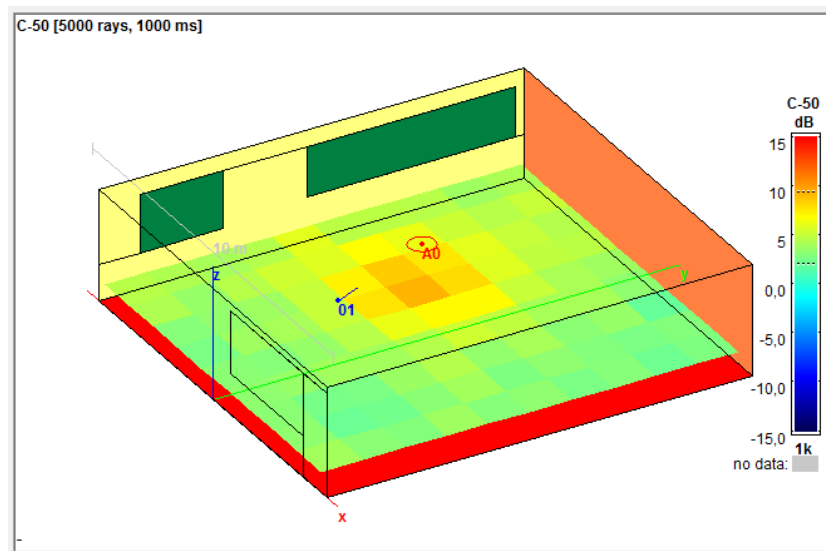


Figura 6.7 Mapa del parámetro  $C_{50}$  del aula 008

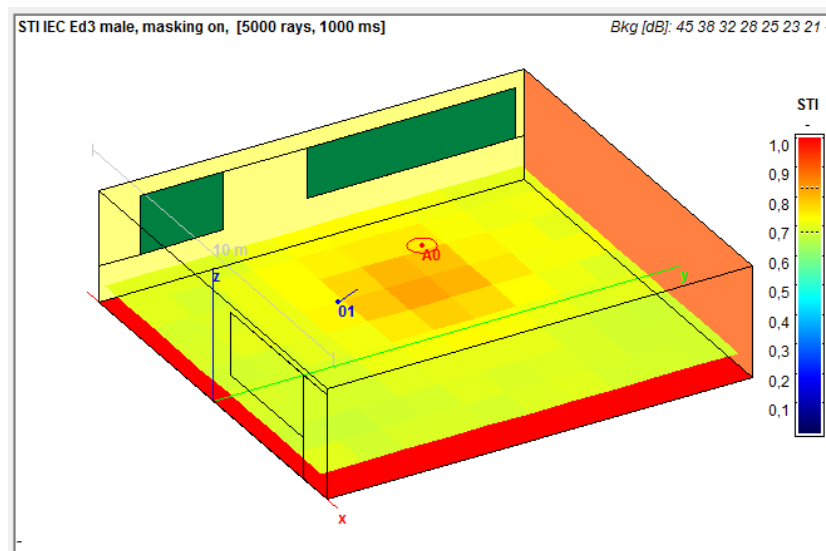


Figura 6.8 Mapa del parámetro STI del aula 008

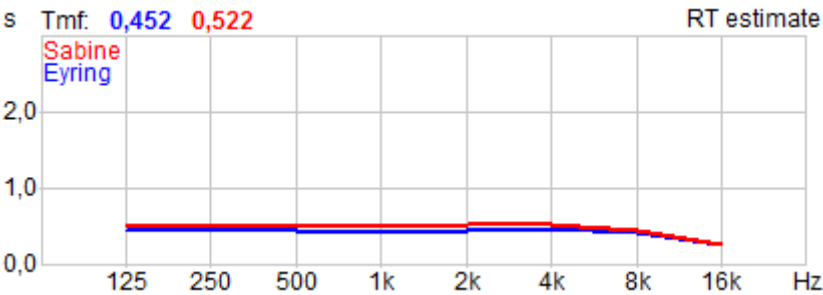
En los apartados siguientes se compararán los resultados proporcionados por el programa con los medidos “in situ” en el aula.

### 6.2.1 Tiempo de reverberación

El software CATT Acoustic además de predecir el tiempo de reverberación, permite estimarlo mediante las fórmulas de Sabine y Eyring, fórmulas basadas en la

teoría estadística, las cuales fueron descritas en el Capítulo III. Diseño acústico de aulas.

Ambas expresiones se basan en la geometría del aula y en los coeficientes de absorción de los materiales para estimar el tiempo de reverberación. En la siguiente gráfica y tabla se muestra el tiempo de reverberación estimado por el programa mediante dichas fórmulas:



Eyring		Sabine		Medida 1	
Hz	s	Hz	s	Hz	s
125	0,46	125	0,54	125	1,54
250	0,45	250	0,52	250	1,03
500	0,44	500	0,52	500	0,94
1 k	0,44	1 k	0,51	1 k	0,92
2 k	0,47	2 k	0,54	2 k	1,04
4 k	0,49	4 k	0,54	4 k	1,04

Los valores estimados son mucho más bajos que los medidos en el aula ya que, como se dijo anteriormente, estas fórmulas se basan solo en la geometría y los coeficientes de absorción de los materiales, sin tener en cuenta otros aspectos como, por ejemplo, los coeficientes de difusión de los materiales.

En un estudio donde se compara la obtención del tiempo de reverberación mediante las fórmulas de Eyring, Sabine, y un programa de simulación acústica, se afirma que ambas fórmulas no son precisas cuando en el recinto objeto de estudio hay una absorción considerable, siendo la medida simulada la más fiable de todas [6].

A continuación, se muestra el tiempo de reverberación simulado por el programa junto con el medido “in situ” en el aula 008:

Simulación	
Hz	s
125	0,84
250	0,72
500	0,92
1 k	1,07
2 k	0,98
4 k	0,80

Medida 1	
Hz	s
125	1,54
250	1,03
500	0,94
1 k	0,92
2 k	1,04
4 k	1,04

Comparando los resultados, se puede observar como los valores obtenidos en la simulación son del mismo orden que los medidos “in situ”, aunque existen algunas diferencias, sobre todo en las frecuencias más bajas, donde los valores simulados son menores que los valores medidos, lo cual se puede deber a un error en la medición. Aún así, se puede afirmar que la simulación se ajusta a los valores medidos, con un margen de error no significativo.

### 6.2.2 Diferentes parámetros de inteligibilidad

Respecto a los diferentes parámetros de inteligibilidad, en las siguientes tablas se comparan los resultados arrojados por la simulación con los resultados de la medición en el aula:

- **EDT**

EDT	
Simulación	
Hz	S
125	0,68
250	0,67
500	0,69
1 k	0,74
2 k	0,72
4 k	0,68
8 k	0,56

EDT	
Medida 1	
Hz	s
125	0,88
250	0,91
500	1,00
1 k	0,84
2 k	0,92
4 k	0,91
8 k	0,74

- **D<sub>50</sub>**

Definición	
Simulación	
Hz	%
125	52,9
250	59,0
500	56,2
1 k	53,4
2 k	55,8
4 k	55,1
8 k	55,8

Definición	
Medida 1	
Hz	%
125	23,0
250	50,3
500	65,2
1 k	60,9
2 k	53,3
4 k	55,7
8 k	66,5

- **C<sub>50</sub>**

Claridad	
Simulación	
Hz	dB
125	0,5
250	1,6
500	1,1
1 k	0,6
2 k	1,0
4 k	0,9
8 k	1,0

Claridad	
Medida 1	
Hz	dB
125	-5,3
250	0,1
500	2,7
1 k	1,9
2 k	0,6
4 k	0,9
8 k	2,9

- **STI**

El programa solo ofrece resultados del STI, pues el RASTI, tal y como se definió en capítulos anteriores, es una aproximación de él.

Criterios de sala	
Simulación	
Valor	0-1
STI	0,68

Criterios de sala	
Medida 1	
Valor	0-1
STI	0,63

Al igual que con el tiempo de reverberación, se observan discrepancias entre los valores simulados y medidos para cada uno de los diferentes parámetros de inteligibilidad. Aún así, se asemejan bastante, y se consideran una aproximación suficiente para el tipo de estudio comparativo (modelo sencillo) que se quiere realizar.

La precisión de los resultados devueltos por el programa de simulación acústica CATT Acoustic viene determinada por las limitaciones del algoritmo, el cual se basa en la acústica geométrica para generar el campo sonoro. A pesar de estas limitaciones, el programa incorpora una serie de correcciones (reflexiones difusas, atenuación debida a la difracción...) que mejoran notablemente los resultados.

También las simplificaciones hechas en el modelo geométrico, punto de partida de todos los cálculos realizados por la simulación, afectan notablemente a los resultados finales.

Por tanto, la fiabilidad conseguida por el programa CATT Acoustic es fuertemente dependiente de los parámetros de configuración, de los materiales asignados a las distintas superficies que aparecen en el modelo geométrico, así como de las simplificaciones hechas al modelar la sala que se pretende simular.



En definitiva, es una herramienta muy cómoda y fácil de utilizar, que procesa una gran cantidad de información en un tiempo corto, sin embargo, se deberá tener un profundo conocimiento de sus parámetros configurables para conseguir una simulación adecuada.

### 6.3 Mejoras acústicas

Una vez realizada la validación de la simulación y haber comprobado que el margen de error de la misma no es significativo, se procederá a simular el aula de nuevo, modificando sus materiales y geometría, con el fin de mejorar su calidad acústica.

#### 6.3.1 Simulación 1

En esta simulación, únicamente, se va a modificar el material del techo, sustituyendo el original por materiales más absorbentes, en concreto, por dos, con coeficientes de absorción superior al original. En la siguiente tabla se muestran estos coeficientes de absorción:

Coeficiente(%) / Frecuencia	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Material absorbente 1	15	70	98	85	91	90
Material absorbente 2	20	35	65	85	85	75

Figura 6.9 Coeficientes de absorción del material absorbente 1 y material absorbente 2

El material absorbente 1 corresponde a placas de 35 mm de poliuretano mientras que el material absorbente 2 corresponde a lana de vidrio de 50 mm de espesor.

El resto de materiales, así como de las características geométricas del aula no han variado.

A continuación, se muestran los valores resultantes de esta simulación comparados con los valores del aula simulada:

### 6.3.1.1 Tiempo de reverberación

Simulación	
Hz	s
125	0,84
250	0,72
500	0,92
1 k	1,07
2 k	0,98
4 k	0,80

<b>TR<sub>mid</sub></b>	1,00
-------------------------	------

Material absorbente 1	
Hz	s
125	0,82
250	0,91
500	0,58
1 k	0,78
2 k	0,88
4 k	0,78

<b>TR<sub>mid</sub></b>	0,68
-------------------------	------

Material absorbente 2	
Hz	s
125	0,80
250	0,80
500	0,74
1 k	0,92
2 k	0,67
4 k	0,82

<b>TR<sub>mid</sub></b>	0,83
-------------------------	------

Se puede apreciar como estos valores son más próximos a los valores aconsejables, en concreto, los correspondientes al material absorbente 1; aún así no cumple con el valor límite impuesto por la normativa (0,5s).

Es evidente que con el empleo de materiales más absorbentes en el techo se mejora la inteligibilidad del aula con respecto a la situación inicial.

### 6.3.1.2 Diferentes parámetros de inteligibilidad

- EDT

EDT	
Simulación	
Hz	s
125	0,68
250	0,67
500	0,69
1 k	0,74
2 k	0,72
4 k	0,68
8 k	0,56

<b>EDT<sub>mid</sub></b>	0,71
--------------------------	------

EDT	
Material absorbente 1	
Hz	s
125	0,65
250	0,62
500	0,71
1 k	0,68
2 k	0,66
4 k	0,69
8 k	0,56

<b>EDT<sub>mid</sub></b>	0,69
--------------------------	------

EDT	
Material absorbente 2	
Hz	s
125	0,62
250	0,61
500	0,68
1 k	0,66
2 k	0,72
4 k	0,69
8 k	0,47

<b>EDT<sub>mid</sub></b>	0,67
--------------------------	------

De los valores de EDT se deduce que con el empleo de materiales más absorbentes en el techo se consigue una mejora en la difusión del sonido en la sala, pues la diferencia entre el tiempo de reverberación y el tiempo de caída inicial, para el caso del material absorbente 1, es nula; y para el caso del material absorbente 2, se puede considerar no significativa.

- D<sub>50</sub>

Definición	
Simulación	
Hz	%
125	52,9
250	59,0
500	56,2
1 k	53,4
2 k	55,8
4 k	55,1
8 k	55,8

Definición	
Material absorbente 1	
Hz	%
125	59,3
250	59,3
500	45,8
1 k	49,3
2 k	56,3
4 k	58,1
8 k	56,0

Definición	
Material absorbente 2	
Hz	%
125	59,0
250	60,8
500	58,2
1 k	53,0
2 k	56,0
4 k	55,1
8 k	70,5

Respecto a la definición, se puede decir que la sustitución de las placas de yeso en el techo por materiales más absorbentes no la mejora, pues los valores no alcanzan el 65% recomendado. Utilizando ambos materiales se observa que la concentración de energía de las primeras reflexiones es insuficiente para tener una buena definición de la voz, y por tanto, una buena inteligibilidad de la palabra.

- $C_{50}$

Claridad	
Simulación	
Hz	dB
125	0,5
250	1,6
500	1,1
1 k	0,6
2 k	1,0
4 k	0,9
8 k	1,0

$C_{50}$	0,89
----------	------

Claridad	
Material absorbente 1	
Hz	dB
125	1,6
250	1,6
500	-0,7
1 k	-0,1
2 k	1,1
4 k	1,4
8 k	1,0

$C_{50}$	0,61
----------	------

Claridad	
Material absorbente 2	
Hz	dB
125	1,6
250	1,9
500	1,4
1 k	0,5
2 k	1,1
4 k	0,9
8 k	3,8

$C_{50}$	0,95
----------	------

En cuanto a la claridad de la voz, al igual que con la definición, el empleo de materiales más absorbentes en la parte superior del aula, no mejora la inteligibilidad de la palabra en la sala. La utilización del material absorbente 1 supone incluso un descenso en la claridad de la voz, mientras que el material absorbente 2 la mejora pero no llega a los 2,5 dB recomendados.

- STI

Criterios de sala	
Simulación	
Valor	0-1
STI	0,68

Criterios de sala	
Material absorbente 1	
Valor	0-1
STI	0,68

Criterios de sala	
Material absorbente 2	
Valor	0-1
STI	0,69

Respecto al índice de transmisión del habla, los valores se han mantenido igual a la situación inicial al emplear materiales más absorbentes, dando un valor de 0,68, tal y como ocurría en la situación inicial.

### 6.3.2 Simulación 2

En esta simulación se va a modificar el techo del aula: la modificación consiste en inclinar el techo 20 cm, manteniendo la altura original del aula como la altura máxima.

En la siguiente imagen se observa el perfil de la nueva aula simulada:

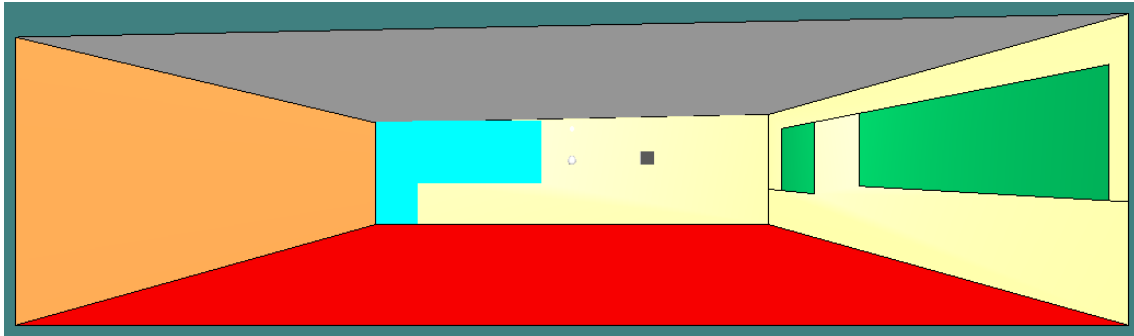


Figura 6.10 Perfil del aula 008 con el techo inclinado

Se simularán dos situaciones, una con el techo inclinado y la otra con el techo inclinado más el material absorbente 2, empleado en la simulación anterior. El resto de características del aula se mantendrá igual a la situación inicial.

A continuación, se muestran los nuevos valores simulados comparados con los valores de la situación original:

### 6.3.2.1 Tiempo de reverberación

Simulación	
Hz	s
125	0,84
250	0,72
500	0,92
1 k	1,07
2 k	0,98
4 k	0,80

<b>TR<sub>mid</sub></b>	1,00
-------------------------	------

Techo inclinado	
Hz	s
125	0,69
250	0,72
500	0,76
1 k	0,79
2 k	0,81
4 k	0,76

<b>TR<sub>mid</sub></b>	0,78
-------------------------	------

TI + MA2	
Hz	s
125	0,72
250	0,68
500	0,59
1 k	0,61
2 k	0,64
4 k	0,70

<b>TR<sub>mid</sub></b>	0,60
-------------------------	------

Los resultados obtenidos de esta nueva simulación muestran que con respecto a la situación original, el tiempo de reverberación disminuye de manera significativa al inclinar el techo, y si se añade material absorbente aún más, alcanzando un valor de 0,60 s. Aunque los nuevos valores simulados no alcanzan el valor recomendado por la normativa para salas destinadas a la palabra, en el caso de TI + MA2 se acerca bastante.

Si se comparan estos resultados con la simulación anterior, se puede observar que la inclinación del techo mejora el tiempo de reverberación solo respecto a cuando se emplea el material absorbente 2. Cuando se utiliza el material absorbente 1, el tiempo de reverberación es menor.

### 6.3.2.2 Diferentes parámetros de inteligibilidad

- EDT

EDT	
Simulación	
Hz	s
125	0,68
250	0,67
500	0,69
1 k	0,74
2 k	0,72
4 k	0,68
8 k	0,56

<b>EDT<sub>mid</sub></b>	0,71
--------------------------	------

EDT	
Techo inclinado	
Hz	s
125	0,59
250	0,63
500	0,64
1 k	0,64
2 k	0,66
4 k	0,56
8 k	0,48

<b>EDT<sub>mid</sub></b>	0,64
--------------------------	------

EDT	
TI + MA2	
Hz	s
125	0,61
250	0,55
500	0,49
1 k	0,47
2 k	0,47
4 k	0,53
8 k	0,41

<b>EDT<sub>mid</sub></b>	0,48
--------------------------	------

Respecto al tiempo de caída inicial, los nuevos valores simulados muestran, en ambos casos (Techo inclinado y TI + MA2), que desde un punto de vista subjetivo, la sala resultaría más “apagada” de lo que se deduciría del valor del tiempo de reverberación, ya que los valores de EDT son menores que los de TR.

- D<sub>50</sub>

Definición	
Simulación	
Hz	%
125	52,9
250	59,0
500	56,2
1 k	53,4
2 k	55,8
4 k	55,1
8 k	55,8

Definición	
Techo inclinado	
Hz	%
125	74,4
250	65,6
500	75,4
1 k	72,9
2 k	69,6
4 k	72,8
8 k	77,9

Definición	
TI + MA2	
Hz	%
125	71,9
250	74,7
500	84,1
1 k	83,6
2 k	85,3
4 k	81,3
8 k	86,4

Como se observa en los datos reflejados en las tablas anteriores, los valores para ambas situaciones son superiores al 65% recomendado en todas las bandas de octava, mucho más en el caso del techo inclinado recubierto del material absorbente 2, por lo que la mejora en la definición de la voz debido a la inclinación del techo queda patente.

- $C_{50}$

Claridad	
Simulación	
Hz	dB
125	0,5
250	1,6
500	1,1
1 k	0,6
2 k	1,0
4 k	0,9
8 k	1,0

$C_{50}$ ("s.a")	0,89
------------------	------

Claridad	
Techo inclinado	
Hz	dB
125	4,6
250	2,8
500	4,9
1 k	4,3
2 k	3,6
4 k	4,3
8 k	5,5

$C_{50}$ ("s.a")	4,15
------------------	------

Claridad	
TI + MA2	
Hz	dB
125	4,1
250	4,7
500	7,3
1 k	7,1
2 k	7,6
4 k	6,4
8 k	8,0

$C_{50}$ ("s.a")	7,13
------------------	------

Respecto a la claridad de la voz, parámetro muy relacionado con la definición, se observa como el valor de  $C_{50}$  ("speech average"), en ambos casos, es superior a los 2,5 dB recomendados. En el caso del techo inclinado recubierto del material absorbente 2, el valor es aún más elevado, por lo que se puede decir que la concentración de energía de las primeras reflexiones es más que suficiente para tener una buena claridad de la voz, y por tanto, una buena inteligibilidad de la palabra.

- STI

Criterios de sala	
Simulación	
Valor	0-1
STI	0,68

Criterios de sala	
Techo inclinado	
Valor	0-1
STI	0,71

Criterios de sala	
TI + MA2	
Valor	0-1
STI	0,78



Por último, en cuanto al índice de transmisión del habla, es evidente que la inclinación del techo hace que mejore la inteligibilidad de la palabra, y si se recubre con material absorbente, aún mucho más. Con estas mejoras se ha conseguido tener una inteligibilidad buena dentro del rango de valores de la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad.

<b>%ALCons</b>	<b>STI/RASTI</b>	<b>Valoración subjetiva</b>
1,4% - 0%	0,88 – 1	Excelente
4,8% - 1,6%	0,66 - 0,86	Buena
11,4% - 5,3%	0,50 - 0,64	Aceptable
24,2% - 12%	0,36 - 0,49	Pobre
46,5% - 27%	0,24 - 0,34	Mala

Figura 6.11 Relación entre %ALCons, STI/RASTI y la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad

[17]

## **Capítulo VII. Conclusiones.**

## Capítulo VII. Conclusiones.

### 7.1 Resumen

A lo largo del proyecto se han ido alcanzando los diferentes objetivos que se proponían en el primer capítulo. Conocer más a fondo el concepto de psicoacústica o entender la propagación del sonido mediante la acústica arquitectónica y geométrica se encuentran entre algunos de ellos.

No obstante, el principal objetivo de este proyecto ha sido estudiar la calidad acústica del aula 008, poniendo de manifiesto su problema acústico mediante la realización de distintas mediciones “in situ” para, una vez conocido el problema, resolverlo mediante varias simulaciones en el programa comercial CATT Acoustic. En dicho programa se ha simulado, en primer lugar, las condiciones acústicas reales del aula 008, para luego rediseñar estas condiciones con el fin de mejorar su comportamiento acústico. Las mejoras se han realizado empleando diferentes materiales absorbentes en el techo del aula, así como modificando la inclinación de este. Se han conseguido, pues, unos niveles acústicos mejores para la docencia en el aula que los existentes en la situación inicial.

### 7.2 Conclusiones

Centrándonos ahora en el objetivo de las mejoras acústicas, vamos a analizar cuál de ellas es la mejor opción para el aula 008.

A continuación se van a ir comparando parámetro por parámetro los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones:

- **Tiempo de reverberación**

En la siguiente gráfica se representa la mejora obtenida según la modificación que se haya hecho en el aula:

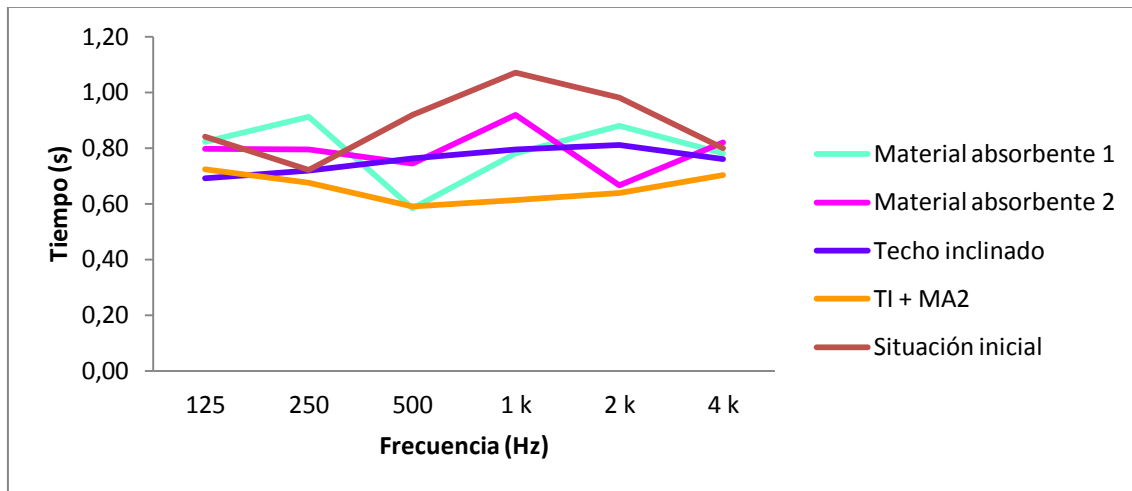


Figura 7.1 Diferentes simulaciones del tiempo de reverberación

El gráfico nos muestra que la mejora en el tiempo de reverberación con respecto a la situación inicial se consigue con la inclinación del techo más el material absorbente 2, pues el valor medio de las frecuencias de 500 Hz y 1 kHz es de 0,60 s, valor cercano al límite establecido por la normativa. Se aprecia también como el techo inclinado da unos valores del tiempo de reverberación más constante a lo largo de todas las bandas de frecuencia.

- **EDT**

También se pueden extraer conclusiones del parámetro EDT. En la siguiente figura podemos ver las variaciones que sufre según la modificación que se haga en el aula.

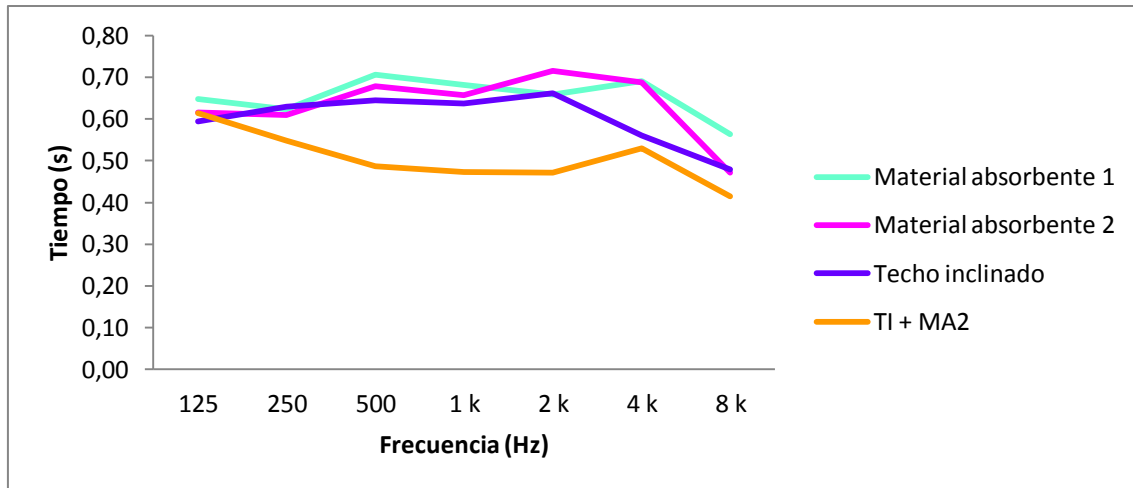


Figura 7.2 Diferentes simulaciones del tiempo de caída inicial

En este caso, es con el material absorbente 1 con el que se consiguen mejores resultados, pues el  $EDT_{mid}$  tiene un valor de 0,69 segundos, un valor muy parecido al que alcanza el tiempo de reverberación con el empleo de este material, haciendo así que la reverberación real y percibida en el aula sean similares. El empleo del techo inclinado aumenta la diferencia entre el EDT y el TR haciendo que la sala resulte más apagada, desde un punto de vista subjetivo, de lo que se deduciría del valor de TR.

- **$D_{50}$**

En el siguiente gráfico se pueden observar los cambios experimentados por la definición según las modificaciones llevadas a cabo en el aula:

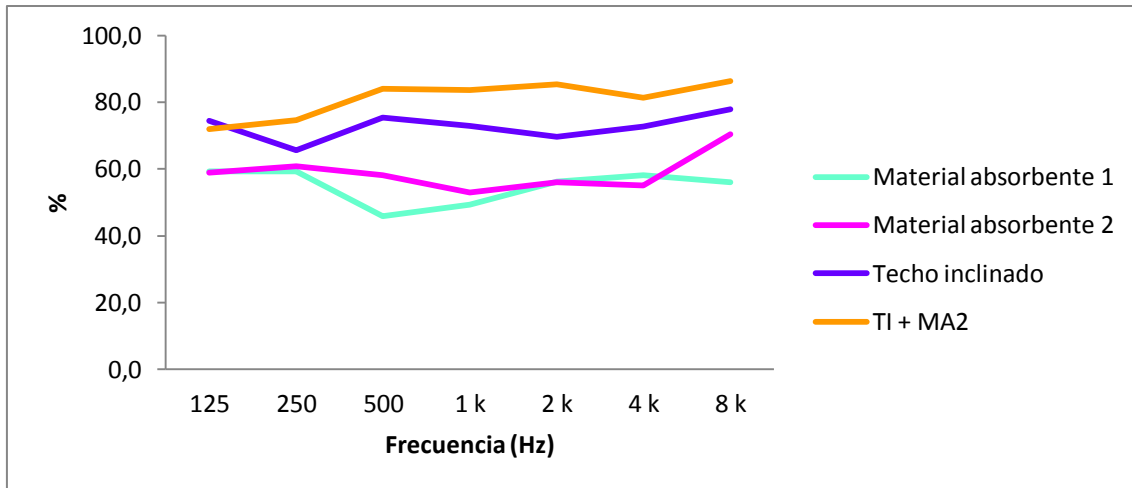


Figura 7.3 Diferentes simulaciones de la definición

Es evidente que la inclinación del techo hace mejorar la definición en el aula y, con ello, la inteligibilidad de la palabra. Si además de inclinar el techo, este es recubierto por un material absorbente, los resultados que se consiguen son realmente buenos, alcanzando valores en torno al 85%, valores muy superiores a los recomendados (65%). Por tanto, el techo inclinado recubierto del material absorbente 2 es la mejor opción para aumentar la inteligibilidad de la palabra en el aula 008.

- **C<sub>50</sub>**

Los valores resultantes de la claridad de la voz se muestran en el siguiente gráfico:

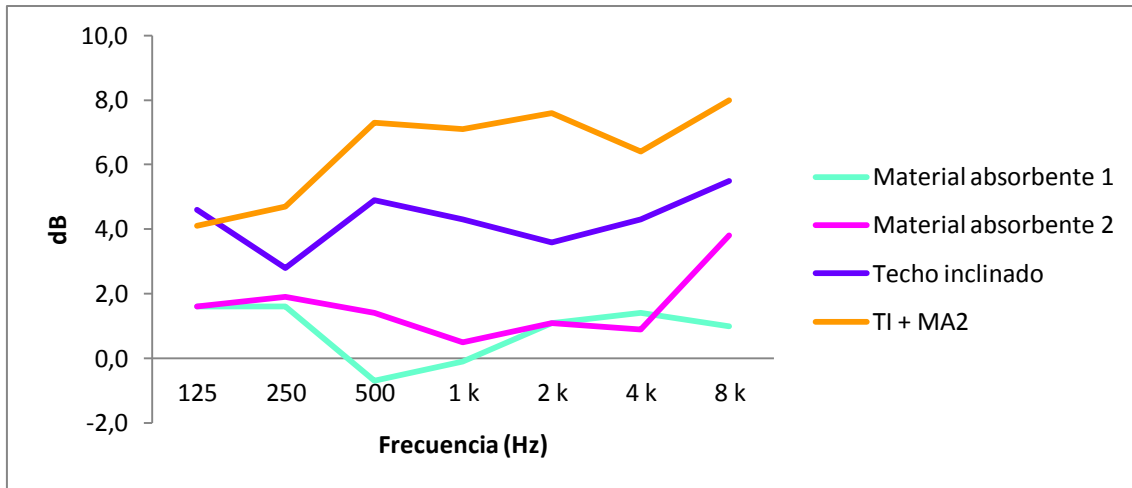


Figura 7.4 Diferentes simulaciones de la claridad de la voz

Al igual que ocurría con la definición, el techo inclinado mejora el parámetro de la claridad de la voz y, por tanto, la inteligibilidad en el aula. Se puede observar como además de inclinar el techo, si se recubre con material absorbente, los valores correspondientes a  $C_{50}$  mejoran. Es entonces la opción TI + MA2 la que mejores resultados, en cuanto a la claridad de la voz, proporciona, con un valor de media de 7,13 dB, un valor muy superior a los 2,5 dB recomendados.

- **STI**

Los valores obtenidos del índice de transmisión del habla en las diferentes simulaciones fueron los siguientes:

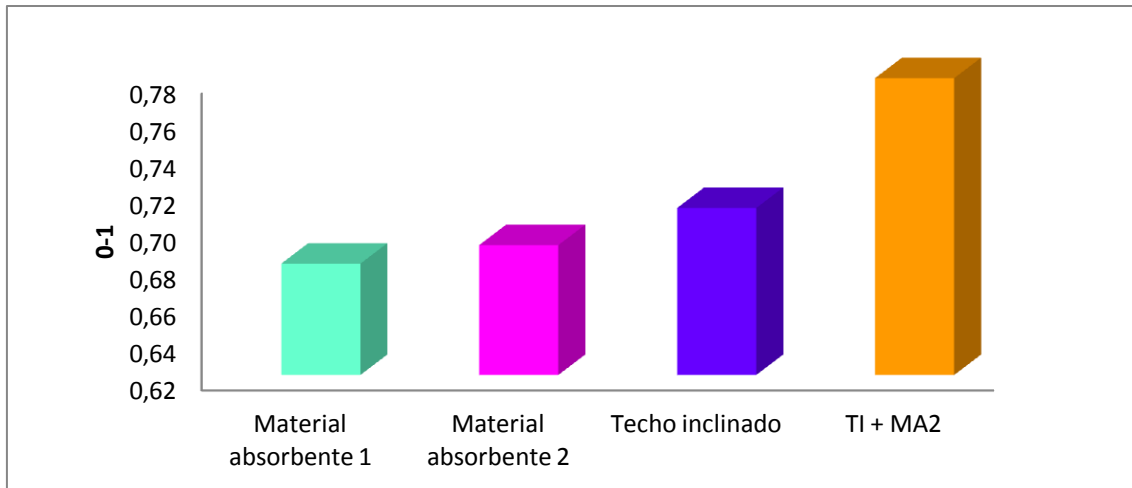


Figura 7.5 Diferentes simulaciones del índice de transmisión del habla

El mejor resultado obtenido en las diferentes simulaciones es, de nuevo, el que corresponde a la mejora TI + MA2. Con esta simulación se ha obtenido un valor de STI de 0,78, lo que se traduce en una inteligibilidad de la palabra buena.

Después de analizar los diferentes parámetros acústicos en las distintas simulaciones del aula 008, se puede decir que el empleo únicamente de materiales absorbentes solo incide de manera significativa en la mejora del tiempo de reverberación. Sin embargo, al inclinar el techo, no solo el tiempo de reverberación mejora, sino que también lo hacen el resto de parámetros acústicos como son la definición, la claridad o el índice de transmisión del habla. La opción más adecuada para conseguir una buena inteligibilidad de la palabra en el aula 008 sería la opción del techo inclinado recubierto del material absorbente 2, pues aunque la condición recomendada por la normativa respecto al tiempo de reverberación no se cumpliría, estaría muy próximo a hacerlo y el resto de parámetros mejorarían notablemente con esta modificación.



Cabe destacar también, que para saber cómo se comporta el aula realmente, se deberían hacer las modificaciones propuestas y medir de nuevo, asegurándonos así de que los parámetros acústicos sean los esperados.

## Bibliografía

- [1] Arau, H. (1999). ABC de la acústica arquitectónica. Barcelona. CEAC.
- [2] Barron, M. (1993). Auditorium Acoustics and Architectural Design. Londres. E&FN Spon.
- [3] Bengt-Inge Dalenbäck. (2010). Engineering principles and techniques in room acoustics prediction. Bergen, Norway. BNAM.
- [4] Beranek, L.L. (1962). Music, Acoustics and Architecture. Nueva York. Wiley.
- [5] Bistafa, S. R., and Bradley, J. S. (2000). Predicting reverberation times in a simulated classroom. J. Acoust. Soc. Am. 108, 1721–1731.
- [6] Carolina Reich Marcon Passero, Paulo Henrique Trombetta Zannin. (2010). Statistical comparison of reverberation times measured by the integrated impulse response and interrupted noise methods, computationally simulated with ODEON software, and calculated by Sabine, Eyring and Arau-Puchades' formulas. Applied Acoustics Volume 71, Issue 12, December 2010, Pages 1204–1210.
- [7] Carrión Isbert, A. (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Barcelona. Edicions UPC.
- [8] CATT-Acoustic v9.0. (2011). User's Manual. CATT, Mariagatan 16A, 41471 Gothenburg, Sweden.
- [9] Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Protección frente al ruido DB-HR, Septiembre, 2009.
- [10] Dalenbäck BI. (1996). Room acoustic prediction based on a unified treatment of diffuse and specular reflection. J. Acoust. Soc. Am.

- [11]dBATI32 Building acoustics measurement and processing software User manual. 01dB. (2003). Head Office 200, chemin des Ormeaux F-69578 Limonest Cedex FRANCE.
- [12]Jens Hee (2003). Impulse response measurements using MLS. <http://jenshee.dk>.
- [13]Kryter, Karl D. (1962). Validation of the Articulation Index. JASA vol. 34, no. 11.
- [14]Kuttruff H. (1991). Room Acoustics. Applied Science.
- [15]Larm P, Hongisto V. (2006). Experimental comparison between speech transmission index, rapid speech transmission index, and speech intelligibility index. J Acoust Soc Am. 2006 Feb;119(2):1106-17.
- [16]Leo L. Beranek (1960). Noise reduction. New York. Edit McGraw-Hill.
- [17]Llinares Galiana, J., Llopis Reyna, A., & Sancho Vendrell, J. (1996). Acústica arquitectónica y urbanística. Valencia. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- [18]Manuel Recuero López, Constantino Gil González (1993). Acústica Arquitectónica. M. Recuero.
- [19]Miyara, Federico (1999). Acústica y Sistemas de Sonido. Rosario, Argentina. UNR Editora.
- [20]Peutz, V.M.A. (1971). Articulation Loss of Consonants as a criterion for speech transmission in a room, J. Audio Eng. Soc., Vol. 19, N° 11.
- [21]Stan, Guy-Bart; Embrechts, Jean-Jacques; Archambeau, Dominique. (2002). Comparison of Different Impulse Response Measurement Techniques. Sound and

Image Department, University of Liège, Institut Montefiore B28, Liège, Belgium.  
JAES. Volume 50 Issue 4 pp. 249-262; April 2002.

[22]Steeneken, H.J.M., Houtgast, T. (1980). A physical method for measuring speech-transmission quality. J. Acoust. Soc. Am. 67 318-326.

[23]TUCT. (2010). User's Manual. Mariagatan 16A, 41471 Gothenburg, Sweden.

[24]UNE-EN ISO 3382-2, Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios, 2008.

[25]Vázquez Rosado, M. (2011). Estudio acústico de las aulas abovedadas en el Edificio Sabatini de la Universidad Carlos III de Madrid. Universidad Carlos III de Madrid.

[26]Vorländer M. (1995). International round robin on room acoustical computer simulations. ICA.

[27]William W. Seto (1973) Acústica, serie Schaum. México. Edit McGraw-Hill.